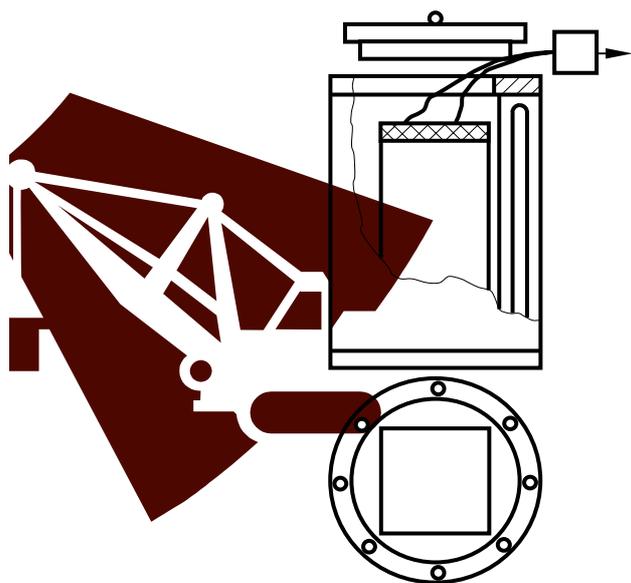


В.М. Фокин

В.Н. Чернышов

**НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ
ХАРАКТЕРИСТИК
СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ**



"ИЗДАТЕЛЬСТВО МАШИНОСТРОЕНИЕ-1"

В.М. Фокин

В.Н. Чернышов

**НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ
ХАРАКТЕРИСТИК
СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ**

МОСКВА

"ИЗДАТЕЛЬСТВО МАШИНОСТРОЕНИЕ-1"

2004

УДК 620.179.1.05: 691:658.562.4

ББК 31.312.06

Ф75

Р е ц е н з е н т ы:

Доктор технических наук, профессор

Д.А. Дмитриев

Доктор технических наук, профессор

А.А. Чуриков

Фокин В.М., Чернышов В.Н.

Ф7
5
Неразрушающий контроль теплофизических характеристик строительных материалов. М.: "Издательство Машиностроение-1", 2004. 212 с.

Рассмотрены методы и приборы для определения теплофизических характеристик строительных материалов и изделий методом неразрушающего контроля.

Предложены методики определения коэффициента температуропроводности строительных материалов, основанные на измерении температуры на поверхно-

сти исследуемого образца в виде призмы квадратного сечения. Представлена методика комплексного определения теплофизических характеристик материалов и изделий методом неразрушающего контроля.

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

УДК 620.179.1.05: 691:658.562.4
ББК 31.312.06

ISBN 5-94275-150-1

© Фокин В.М., Чернышов В.Н., 2004

© "Издательство Машиностроение-1", 2004

Научное издание

ФОКИН Владимир Михайлович,

ЧЕРНЫШОВ Владимир Николаевич

**НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ
ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК
СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ**

Монография

Редактор З.Г. Чернова

Инженер по компьютерному макетированию М.Н. Рыжкова

Подписано к печати 15.09.2004

Формат 60 × 84/16. Гарнитура Times. Бумага офсетная. Печать офсетная

Объем: 12,32 усл. печ. л.; 12,15 уч.-изд. л.

Тираж 400 экз. С. 627^М

"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

ПРЕДИСЛОВИЕ

Монография посвящена разработке научно-методологических основ и приборного обеспечения для определения теплофизических характеристик строительных материалов и изделий методом неразрушающего контроля.

Математическим исследованием выявлены критерии подобия, характерные для процесса распространения тепла в образце в виде призмы квадратного сечения, и получена закономерность упорядоченного теплового режима для исследуемой призмы, которая соблюдается при любых способах симметричного нагревания или охлаждения. Приведены методики для определения коэффициента температуропроводности строительных материалов, основанные на измерении температур на поверхности образца в виде призмы квадратного сечения. Разработанный метод неразрушающего контроля позволяет установить начало наступления упорядоченной части теплового периода по тепловым изменениям на поверхности образца.

В монографии представлена методика для комплексного определения теплофизических характеристик строительных материалов и изделий методом неразрушающего контроля. Приводится аппаратное обеспечение для экспериментального определения коэффициента температуропроводности, объемной теплоемкости, теплопроводности строительных материалов и изделий, а также даны методические указания по созданию экспериментальных установок и проведению опытов. Представлены результаты экспериментального определения теплофизических характеристик оргстекла, фторопласта, бетона, красного и силикатного кирпича при различных условиях нагрева и охлаждения.

Разработана методика и приборное обеспечение для определения плотности теплового потока в экспериментальных установках, а также от наружных ограждений зданий, сооружений и через остекление.

Исследована погрешность, их характеристики и надежность измерений при определении теплофизических характеристик материалов методом неразрушающего контроля.

УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

T, t – текущая температура по шкале Кельвина (К) и Цельсия ($^{\circ}\text{C}$)

$T(0; \tau); T_{\text{ц}}$ – температура центра тела

$T(R; \tau); T_{\text{п}}$ – температура поверхности тела

T_0 – начальная температура тела

$T_{\text{с}}$ – температура окружающей среды

T^* – стационарная температура

$\vartheta = (T - T_0)$ – избыточная температура

$\theta = T/T_0$ – безразмерная относительная температура

x, y, z – текущие координаты

τ – время, с

$2R$ – полная толщина исследуемого образца, м

l – линейный размер, м

u – периметр сечения образца, м

f – сечение образца, м²

ξ – фактор формы исследуемого образца

q – плотность теплового потока, Вт/м²

ρ – плотность материала, кг/м³

$(c\rho)$ – объемная теплоемкость материала, Дж/(м³ · К)

a – коэффициент температуропроводности, м²/с

λ – коэффициент теплопроводности, Вт/(м · К)

α – коэффициент конвективного теплообмена Вт/(м² · К)

$\varepsilon_{\text{п}}$ – приведенная степень черноты системы

$\nu_{\text{ж}}$ – коэффициент кинематической вязкости жидкости, м²/с

μ_n – характеристические числа

$\sigma_0 = 5,67 \cdot 10^{-8}$ – константа излучения абсолютно черного тела, Вт/(м² · К⁴)

$Fo = \frac{a\tau}{R^2}$ – 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

ИИС – информационно-измерительная система

В настоящее время одной из наиболее актуальных проблем является поиск и создание энергосберегающих мероприятий и инженерных решений по созданию тепло- и технологических процессов с минимальными тепловыми потерями. Большую роль в этом играет знание теплофизических характеристик (ТФХ) 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.

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. На некоторые изделия и материалы паспортные данные есть, на другие – нет. 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 ТФХ 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 ТФХ материалов и изделий как на стадии технологического контроля в процессе производства, так и на стадии контроля качества готовых изделий при различных режимах их эксплуатации.

Кардинальный ответ на запросы техники – развитие методов расчета и прогнозирования теплофизических характеристик на основе фундаментальных научных обобщений. Несмотря на определенные успехи в этом направлении, методы предсказания свойств пока еще должного развития не получили и главным источником информации остается эксперимент. Важнейшим условием повышения эффективности эксперимента является высокая производительность всего цикла измерений, включая монтаж и демонтаж образцов. Это требует разработки и внедрения неразрушающих методов испытания материалов и изделий, которые практически позволяют оценить качество продукции и ее влияние на энергосбережение. Тепловые методы неразрушающего контроля и диагностики позволяют определять качество исследуемых строительных материалов по их теплофизическим характеристикам.

Для определения ТФХ 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 ТФХ материалов стационарными методами, сопровождается рядом побочных явлений: утечки тепла через торцы, конвекция, излучение, скачек 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 с стационарными снижены требования к тепловой защите, затрачивается меньше времени и тепловой энергии для проведения эксперимента. Комплексные методы позволяют определять одновременно из одного эксперимента на одной установке и на одном образце несколько теплофизических характеристик. В абсолютных методах определение параметров осуществляется непосредственным измерением. В относительных методах определяемые параметры зависят от постоянной прибора и определяются путем тарировки по эталонному веществу, материалу или образцу.

В большинстве методов определения ТФХ 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 проведения 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 ТФХ материалов должен быть неразрушающий метод, основанный на измерениях температур на поверхности без нарушения целостности образца.

Наиболее полную информацию о ТФХ 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 таким, чтобы с помощью несложных математических зависимостей адекватно описать физику процесса.

В последнее время появляется тенденция проводить исследования ТФХ материалов таким образом, чтобы результаты измерений параметров были двумерными показателями. Двумя компонентами такого двумерного параметра могут быть, например, температура на поверхности и в центре исследуемого тела, либо амплитуда и период температурного колебания. С другой стороны, сами измерения, например температуры на поверхности образца, содержат данные, которые могут описывать целый ряд других параметров. Предпринималось значительное число попыток для отыскания таких видов преобразований первичных данных, которые обеспечивали бы зависимость каждой составляющей результата измерений только от одного или двух измеряемых параметров и нечувствительность к измерениям других параметров. Иногда это удается сделать.

Так был получен абсолютный метод определения коэффициента температуропроводности материалов, основанный на контактном измерении температур на поверхности образца в двух точках – на ребре и середине грани призмы квадратного сечения. Интерес к измерениям коэффициента температуропроводности обусловлен рядом причин. Прежде всего, температуропроводность является паспортной характеристикой существующих и вновь разрабатываемых материалов, число которых непрерывно растет. Тесно связаны со знанием температуропроводности задачи экономии энергии, расчета тепловых режимов сложных конструкций, оптимизации технологических процессов в различных температурных интервалах. Кроме того, температуропроводность, как теплофизический параметр, является эффективным инструментом в научных исследованиях.

Методы теплофизического анализа и неразрушающего контроля 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 ТФХ в течение одного опыта без нарушения структуры материала.

Разработанные методы выгодно отличаются от известных методов быстродействием, небольшой погрешностью, обладают новизной и оригинальностью. Кроме того, методики позволяют легко автоматизировать теплофизический эксперимент, упрощается реализация на базе микропроцессорной техники, и поэтому являются перспективными для использования в информационно-измерительных системах неразрушающего контроля ТФХ материалов, в строительной теплотехнике, различных отраслях народного хозяйства.

1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И ОБЗОР ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ МЕТОДОВ

1.1. ХАРАКТЕРИСТИКА ТЕПЛОВЫХ РЕЖИМОВ И МЕТОДОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ

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

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

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

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

Все эти тепловые режимы широко применяют в инженерной практике, научных исследованиях и определении ТФХ различных материалов. Однако для тел или образцов определенной формы требуется предварительное знание вида функции температурного поля, которое описывается дифференциальным уравнением. Кроме того, для его конкретизации необходимо добавить еще ряд уравнений, называемых условиями однозначности.

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

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

Граничные условия задаются несколькими возможными случаями:

- 1 рода – задано распределение температуры на поверхности тела;
- 2 рода – задано распределение теплового потока на поверхности тела;
- 3 рода – 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 ТФХ материалов (коэффициента температуропроводности, теплопроводности, теплоемкости) применяют стационарные, нестационарные и комплексные методы.

Стационарные методы основаны на законе теплопроводности Фурье для стационарного теплового потока [63, 87, 107, 109, 120, 133, 134, 136, 140, 150, 175, 192–201, 219, 234, 252].

При реализации стационарных методов исследуемому материалу – образцу придается форма пластины, цилиндрической полый трубы, сферической оболочки, внутри которых создается соответствующее одномерное температурное поле. Экспериментальное определение ТФХ материалов сопровождается

ся рядом побочных явлений: утечки тепла через торцы, конвекция, излучение, скачек температуры на границе твердого тела и газа (жидкости). Для устранения тепловых потерь применяются разнообразные охранные нагреватели, кольца, колпачки. При использовании стационарных методов исследования в процессе нагрева исследуемых влажных материалов происходит перераспределение влаги, что искажает опытные данные.

Нестационарные методы определения ТФХ материалов [6, 18, 27, 28, 36, 39, 44, 51, 72, 93, 97, 114, 133, 150, 169, 197, 198, 209, 219, 236, 239] 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 [100, 101, 198, 239] могут быть подразделены на группы первого, второго и других видов. Следует отметить, что в [133] 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 ТФХ 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 с 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 ТФХ материалов также используют комплексные методы, которые в большинстве случаев основываются на теории начальной и упорядоченной стадии нестационарной теплопроводности. Комплексные методы позволяют определять одновременно из одного эксперимента на одной установке и на одном образце несколько ТФХ в широком интервале температур. При сохранении времени на проведение эксперимента комплексные методы позволяют получить более полную информацию о ТФХ веществ. Если изготовление строго одинаковых по структуре образцов затруднительно (например, структура гетерогенных, анизотропных веществ), то осуществление эксперимента на одном образце комплексным методом существенно повышает точность определения ТФХ материала.

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

Все методы и реализующие их измерительные средства разделяются на две группы: контактные и бесконтактные. Использование контактных методов превалирует в способах исследования и определения ТФХ веществ и материалов. Однако в последнее время отмечается рост бесконтактных методов и измерительных средств [5, 9, 15, 36, 74, 93, 94, 160, 229].

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 [17, 36, 46, 48, 53, 81, 85, 86, 91, 97, 101, 109, 111, 112, 115, 117, 119, 122, 123, 128 – 132, 154, 155, 157, 174, 178, 179, 183, 197, 198, 201, 208, 228, 224, 245].

Среди перечисленных методов особое место в определении ТФХ веществ занимают тепловые методы неразрушающего контроля и диагностики (ТМНК). Методы неразрушающего контроля позволяют определять качество исследуемых материалов и изделий, обладают высокой оперативностью и широкими функциональными возможностями [10, 11, 12, 15, 36, 46, 86, 117, 119, 157, 160, 209, 223, 230, 236].

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, 100, 101]. Второй наблюдается в процессах

нагрева тел постоянным тепловым потоком и известен как квазистационарный тепловой режим [28, 29, 156, 237, 266]. Другие практически важные случаи взаимодействия тел с окружающей средой в режиме упорядоченного периода изучены существенно меньше и находятся в стадии совершенствования.

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

Закономерности распространения тепла в твердых телах всегда привлекали внимание многих исследователей. Большой вклад в науку теплофизических исследований внесли ученые: А.В. Лыков [133–135], Н.Ю. Тайц [193], В.В. Курепин [114–119], Г.Н. Дульнев [70–73], Г.М. Кондратьев [100, 101], Е.С. Платунов [168, 169], Л.П. Филиппов [218, 219], П.В. Черпаков [231], А.Г. Шашков [239, 240], С.Ф. Чистяков [234], Н.С. Мецик [142], В.В. Иванов [42], Г.П. Бойков [27, 28], Ю.В. Видин [41], Г.А. Луцаев [128, 130], Е.И. Фандеев [207, 208], В.Г. Ушаков [129, 132], Н.А. Ярышев [251–255] 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 [226] Г. Карслоу, Д. Егер [90], Ли, Тейлор [126], О. Крейт, У. Блек [107], М. Марич [137], Э.М. Сперроу [188], Р. Висканта [276] и многие другие.

В монографии большое внимание уделено основам теории упорядоченного теплового режима при сложных граничных условиях. Закономерности упорядоченного теплового режима включают в свою структуру коэффициент температуропроводности вещества и позволяют на основе экспериментов находить его значение. В литературе [5, 10, 13, 15, 17, 27, 29, 37, 39, 46, 49, 62, 71, 74, 93, 96, 106, 116, 118, 158, 168, 197, 198, 209, 227, 243] можно встретить ряд методов, позволяющих определять температуропроводность материалов. Эти методы обладают своими преимуществами и недостатками.

1.2. ОБЗОР ПРЕДШЕСТВУЮЩИХ ИССЛЕДОВАНИЙ И МЕТОДОВ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРОПРОВОДНОСТИ, ТЕПЛОЕМКОСТИ И ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ МАТЕРИАЛОВ

1.2.1. Метод регулярного теплового режима

Теория регулярного режима была разработана Г.М. Кондратьевым [100] и в последующем углублена другими исследователями [18, 28, 36, 48, 52, 63, 72, 87, 134, 140, 150, 197, 198, 219, 231]. Метод регулярного теплового режима получил весьма широкое распространение в теплотехнических лабораториях по определению ТФХ строительных, теплоизоляционных, облицовочных твердых, сыпучих и порошковых материалов.

Методы регулярного режима первого рода, основные закономерности которых рассмотрены в [100, 101, 133], получили широкое использование для определения коэффициента температуропроводности a , коэффициента теплопроводности λ , а также теплоемкости c материалов.

Для регулярного режима первого рода, под которым принято понимать упорядоченную, свободную от начальных условий стадию охлаждения (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

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

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

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

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

Получается задача о нагреве или охлаждении тела при так называемых граничных условиях первого рода. Измерения избыточных температур в моменты времени τ_1 и τ_2 осуществляются с помощью дифференциальной термопары, подключенной к гальванометру, спаи которой монтируются в центральной зоне образца и в среде с интенсивной теплоотдачей.

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

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

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

Корни характеристического уравнения определяются из выражения

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

где α – коэффициент теплоотдачи от воды к поверхности пластины;

λ – коэффициент теплопроводности вещества.

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

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

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

После логарифмирования избыточной температуры ϑ получим

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

Комплекс $\mu_1^2 \frac{a}{R^2} = m$ называется темпом охлаждения (или нагрева) и характеризует относительную скорость изменения температуры тела во времени. Для определения темпа охлаждения по данным измерения температуры тела во времени строят график $\ln \vartheta = f(\tau)$, в котором m представляет собой угловой коэффициент линейного участка, характеризующего регулярный режим. Графически регулярный тепловой режим показан на рис. 1.2.1.

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

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

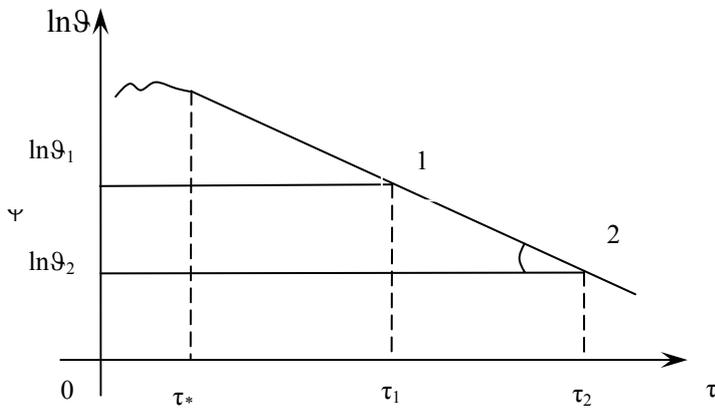


Рис. 1.2.1. Характер изменения натурального логарифма избыточной температуры ϑ от времени τ :

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

где ϑ_1, ϑ_2 – избыточные температуры в фиксированных точках тела в момент времени τ_1 и τ_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.

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 $Bi \rightarrow \infty$. Исследования обычно проводят на образцах простой формы (плита, цилиндр, шар). Автор данного метода профессор Г.М. Кондратьев [100, 101] создал весьма удобную экспериментальную установку " a -калориметр", схема которой показана на рис. 1.2.2.

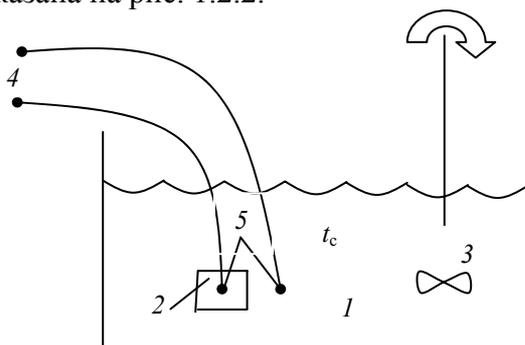


Рис. 1.2.2. Схема экспериментальной установки "а-калориметр":

- 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

Реализация метода регулярного режима осуществляется при температурах, близких к комнатным. Установка а-калориметр представляет собой тонкостенный металлический стакан (сосуд), выполненный из металла (медь, латунь и т.п.) с высоким коэффициентом теплопроводности, наполненный исследуемым материалом и имеющим дифференциальную термопару. Предварительно нагревание а-калориметра осуществляется в сушильном шкафу с электрическим нагревателем. Затем нагретый а-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 а-калориметра в среде кипящей воды при $t_c = \text{const} = 100^\circ\text{C}$.

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 температуропроводности.

Коэффициент температуропроводности определяется из соотношения

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

или

$$a = K m,$$

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

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

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

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

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 % [198].

Преимущества метода:

- 1) метод абсолютен, не требует эталонов с известными тепловыми свойствами;
- 2) обеспечивает достаточно высокую точность эксперимента;
- 3) опыт идет непродолжительное время, а формулы для обработки экспериментальных результатов имеют простой вид.

Недостатки метода:

- 1) для эксперимента необходима капельная среда (жидкость);
- 2) опыт соответствует теории только при условии, когда температура окружающей среды t_c на протяжении всего опыта остается постоянной;
- 3) во избежание смачивания образца и проникновения влаги внутрь исследуемого материала его помещают в герметично закрытый стакан или его поверхность покрывают эпоксидной смолой или лаком;
- 4) опыты с сыпучими материалами приходится производить в специальных условиях (герметично закрытом стакане);
- 5) обязательно обеспечивать большую величину коэффициента теплоотдачи.

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

$$m = \frac{a}{R^2} K_p,$$

где K_p – критерий Кондратьева.

Коэффициент температуропроводности вещества определяется из соотношения $a = K m$.

В методе лямбдакалориметра определяется и коэффициент *теплопроводности* образца (материала)

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

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

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

По методу двух точек при охлаждении испытуемого образца нужно измерять значения избыточных температур в двух произвольных точках тела в один и тот же момент времени. На практике в большинстве случаев регистрируют 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 полой металлической оболочки (плоской, цилиндрической или шаровой формы), внутри которой с небольшим зазором размещается сплошное металлическое ядро (такой же формы). Зазор заполняется исследуемым материалом. Для измерения температур в ядре бикалориметра производится сверление для закладки рабочих концов (спаев) термопар.

В процессе опыта бикалориметр с исследуемым материалом помещается в печь для предварительного нагревания, а затем в термостат, где обеспечиваются необходимые условия охлаждения. При другой реализации метода в ядре устанавливается электрический нагреватель (для подогрева ядра перед опытом), а через оболочку пропускается жидкость от термостата. На основании опытных измерений определяется темп охлаждения, а затем по расчетному уравнению вычисляется коэффициент теплопроводности λ [198].

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

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

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

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

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

Коэффициент формы тела – K определяется из соотношений:

- для плоского бикалориметра

$$K_{\text{п}} = 1;$$

- для цилиндрического бикалориметра

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

- для шарового бикалориметра

$$K_{\text{ш}} = R_2 / 3R_1,$$

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

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

$$N = (3Ж) / (3Ж + K);$$

$$Ж = (1 + K + c_1 K^2) / (3K c_2),$$

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 $3 \dots 6 \text{ Вт} / (\text{м}^2 \cdot \text{К})$, при $Bi < 0,1$ и пригоден для определения массовой теплоемкости твердых материалов c [198]. 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 [101]:

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

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 % [198].

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 [28, 29, 38, 44, 63, 106, 150, 156, 193, 237, 266]. 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 [90, 133]:

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

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 Φ имеет вид

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

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

Для экспериментального исследования и определения теплофизических характеристик материалов 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 , м²/с:

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

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

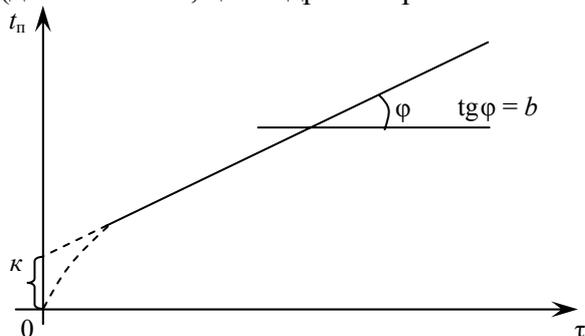


Рис. 1.2.3. Характер изменения температуры на поверхности пластины при нагреве с двух сторон постоянным тепловым потоком

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

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

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

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 которых определяется b , Δt или $\Delta \tau$.

На основе этого абсолютного метода разработан ряд сравнительных методов нагревания с постоянной скоростью [133].

Преимущества метода:

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

Недостатки метода:

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

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

Кроме того, необходимо достичь таких условий опыта, когда все тепло от основных электрических нагревателей полностью уходило бы внутрь образца. Эсдорн и Кришер предложили установку [266] 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 [71, 116, 119, 168, 169, 198, 227, 231]. Под монотонным тепловым режимом принято понимать плавный разогрев или охлаждение тел в широком диапазоне изменения температуры со слабопеременным полем скорости внутри образца.

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

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

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

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

Метод тонкой пластины основан на закономерностях монотонного разогрева исследуемого образца в режиме, когда его температурное поле остается близким к стационарному режиму и использует расчетные уравнения для коэффициента λ , приведенные в [169].

В качестве образцов используются диски диаметром 10...20 мм и толщиной 0,5...10 мм. Испытуемый образец помещается внутри металлического ядра λ -калориметра (ДК- λ -400), окруженного теплозащитной оболочкой, и монотонно разогревается вместе с ним. При реализации метода обычно используется вторая пластина (стержень) с известной теплоемкостью c_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- λ -400) расчетная формула имеет вид [198]:

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

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

Метод реализован без тепломера и с тепломером в виде калориметров приборного оформления массового назначения применительно к твердым теплоизоляторам и полупроводникам с $\lambda = 0,1...10$ Вт/(м · К) в диапазоне температур от -100 до $+400$ °С. Погрешность измерений не превышает 7 % [169].

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

Метод непрерывного нагрева основан на закономерностях квазистационарного режима при монотонном изменении температуры образца, когда $b \neq \text{const}$ [106].

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 [198]:

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

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

В выражения для поправок ε и η входит Δt_R – поправка на перепад температуры по радиусу образца. Образец в виде круглого стержня диаметром 20...50 мм, в среднем сечении которого на оси и по

верхности заложены термопары, помещаются внутри электрического нагревателя и разогреваются вместе с ним. В опыте измеряются время запаздывания Δt и перепад Δt_R . Поправкой η можно пренебречь, когда режим нагревания соответствует малым температурным перепадам, если $\Delta t_R \leq 40$ °С. Поправкой ϵ также можно пренебречь через несколько минут после начала опыта [106].

Схемы измерительных участков и порядок проведения опытов при исследовании коэффициента теплопроводности a тепловой изоляции в воздушной, гелиевой среде и в условиях вакуума приводятся в [150].

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

В методе радиального разогрева исследования проводят в воздушной среде и условиях вакуума, до температуры 900 °С [169], на образцах в виде тонких дисков, либо коротких стержней длиной l , малого диаметра и постоянного сечения с $\lambda = 1 \dots 50$ Вт/(м · К).

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

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

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 реализоваться в сравнительном и абсолютном вариантах и используется для исследования *теплоемкости* различных теплоизоляционных материалов (применим также к металлам, полупроводникам) до температур 400 °С [169].

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 $\Delta t_T(\tau)$ 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 $c_c(t)$ [169].

Схемы температурных измерений, а также разновидности металлических тепломеров и конструктивного оформления c -калориметров рассматриваются в [169]. Погрешность измерений до 5 %.

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

1.2.4. Методы теплового импульса или мгновенного источника

Методы теплового импульса [37, 51, 82, 118] 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 , измеряют время, в течение которого достигается максимальная температура на противоположной поверхности образца.

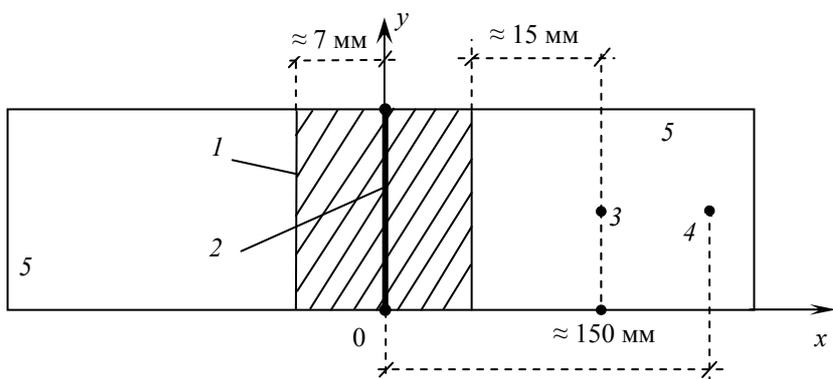


Рис. 1.2.4. Схема экспериментальной установки метода мгновенного теплового импульса:

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

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

После измерений определяется температуропроводность:

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

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

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

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

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

Кратковременный тепловой импульс [137, 181, 218] между двух полуограниченных тел (параллелепипедов, стержней) позволяет также определять температуропроводность материалов по измерениям времени τ и максимального изменения значения температуры в точке, находящейся на расстоянии H от теплового источника: $a = H^2 / (2 \tau_{\max})$.

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

Среди методов импульсного типа в последние годы получил широкое распространение метод нагрева лазерным импульсным излучением плоских образцов-дисков [74]. 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 [97, 184]. 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 $\operatorname{erf}(x)$ и $i \operatorname{erfc}(x)$.

Метод двух временных интервалов получил достаточно широкое распространение как один из существующих скоростных методов для определения коэффициента температуропроводности веществ [40]. 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 вре-

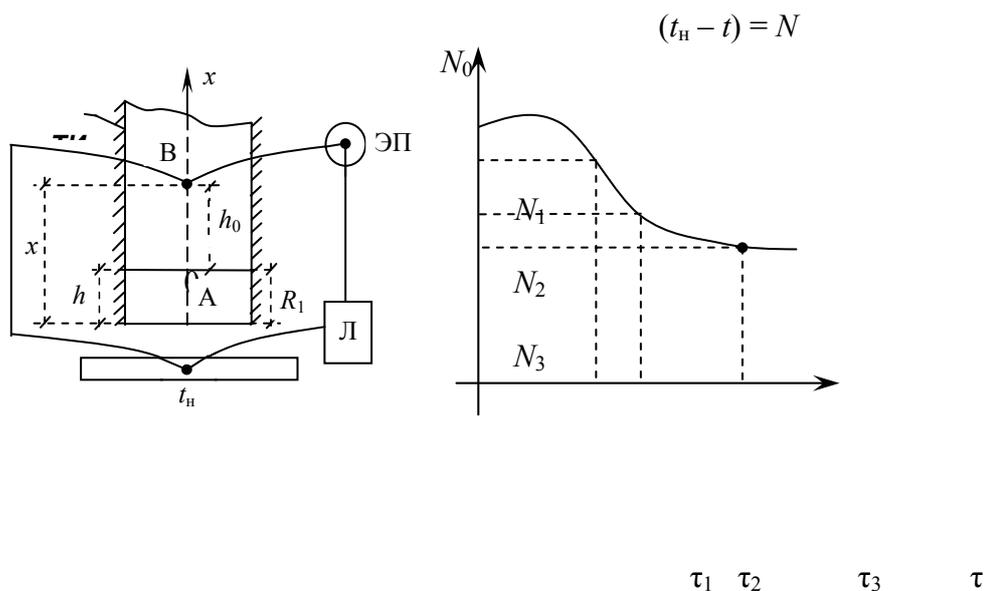


Рис. 1.2.5. Экспериментальная установка и ожидаемый характер изменения перепада температур N :

ЭП – измерительный прибор; Л – регулятор постоянной мощности;
А – образец; В – теплоприемник (оргстекло, эбонит, резина, цемент);

ТИ – тепловая изоляция вокруг цилиндрического объекта

мени τ в точке 0 в предположении, что начальная температура (при $x = \infty$) поддерживается равной нулю. Далее решаются совместно дифференциальные уравнения теплопроводности для образца и теплоприемника с учетом контактных условий в месте соприкосновения плоскостей (при $x = R_1$).

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

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

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 τ и, следовательно, завышение значения температуропроводности.

Борьба с тепловыми потерями ведется самыми разнообразными способами. С одной стороны, выбираются образцы с малым отношением толщины к диаметру [5]; с другой, для устранения потерь тепла конвекцией, радиацией и теплопроводностью образцы помещают в вакуум, экранируют и окружают тепловой изоляцией [80]. 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 φ соизмеримо с характеристическим временем τ [40]. 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 термодпар неизбежно приводит к тепловым контактным сопротивлениям между образцом и температурным датчиком. В результате значение максимальной температуры образца будет заниженным, а инерционность термодпары резко возрастет [158].

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 [38, 39, 40, 133, 148, 150, 151, 235, 239].

Ряд нестационарных методов комплексного определения теплофизических свойств основан на решении задач теплопроводности при действии источника (зонда) постоянной мощности (плоского, цилиндрического, сферического) в неограниченной среде [133, 151, 239, 241].

Метод плоского источника постоянной мощности основан на закономерности развития одномерного температурного поля в полуограниченном теле при нагревании его постоянным тепловым потоком [133].

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 [148, 198]:

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

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

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

Коэффициент тепловой активности, определяемый по тангенсу угла наклона прямой $\Delta t_n = \varphi(\tau^{0.5})$, численно равен [198]

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

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 [133], положены в основу создания ряда импульсных методов комплексного определения теплофизических характеристик различных материалов [133, 151, 239, 241].

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

Расчетные формулы имеют вид [239]:

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

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

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 [239].

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 τ_0 , фотоэлектрический самопишущий прибор для регистрации зависимости $\Delta t_{\max} = f(\tau)$ и промежуточное пусковое реле, синхронизирующее работу реле времени с подачей мощности на источник тепла [121, 198].

Комплексный импульсный метод плоского источника тепла рассматривается в [198, 240], а комплексные методы мгновенного теплового импульса в [150, 151, 198, 241].

Комплексные методы, основанные на автоматических режимах, могут быть отнесены к зондовым методам. Теория зондовых методов основана на анализе автоматических задач теплопроводности. На решении этих задач базируются экспериментальные методы, позволяющие учесть влияние зависимости теплофизических свойств от температуры [151, 198].

Сравнительные методы с применением "неограниченного эталона" используются для комплексного определения теплофизических свойств материалов в начальной стадии теплообмена. Эти методы основаны на уравнениях, описывающих температурные поля плотно соприкасающихся между собой двух сред: исследуемого материала и эталона с известными коэффициентами a , и λ , при наличии источника тепла [100, 133, 239, 241],

Особое место в определении ТФХ веществ занимают *тепловые методы неразрушающего контроля* и диагностики (ТМНК), также основанные на мгновенном или импульсном тепловом воздействии на исследуемый образец. Методы неразрушающего контроля позволяют определять качество исследуемых материалов и изделий, обладают высокой оперативностью и широкими функциональными возможностями [10, 11, 12, 15, 36, 46, 86, 117, 119, 157, 160, 209, 223, 230, 236].

В ТМНК [9–12, 229, 230] на поверхности исследуемого тела, теплоизолированного от окружающей среды, помещается линейный импульсный источник тепла, а на заданном определенном расстоянии от него – рабочие концы двух термопреобразователей (термопар). Затем от источника тепла подается тепловой импульс заданной мощности и фиксируется такой момент времени τ_1 , при котором соотношение между избыточными температурами, достигнет определенного, наперед заданного значения

$$T(x_1, \tau_1) = nT(x_2, \tau_2),$$

где $T(x_1, \tau_1)$ и $T(x_2, \tau_2)$ – соответственно температура в двух разноотстоящих от линейного источника тепла в точках поверхности исследуемого тела x_1 и x_2 в момент времени τ_1 ; n – постоянный коэффициент ($n > 1$).

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

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

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

Однако при определении момента времени τ_1 приходится непрерывно производить сравнения между собой низких по уровню сигналов двух термопреобразователей. Для устранения такой процедуры в алгоритм измерения вносят изменения, состоящие в том, что в заданный момент времени τ_1 измеряют температуры в точках поверхности тела x_1 и x_2 . Это обстоятельство существенно упрощает реали-

зацию метода ТМНК ТФХ и способствует снижению погрешности результатов измерения, так как момент времени τ_1 в этом случае может быть задан с высокой степенью точности.

Расчетные формулы при этом имеют вид

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

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

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

Для повышения точности ТМНК ТФХ после подачи теплового импульса в два заранее заданные моменты времени τ_1 и τ_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 ТФХ материалов производят и при бесконтактном тепловом воздействии от подвижного источника тепла [9–12, 229, 230]. В основу теории большинства тепловых методов бесконтактного неразрушающего контроля ТФХ твердых материалов положено явление собственного теплового излучения с поверхности исследуемых материалов и изделий, пропорционального четвертой степени их абсолютной температуры. Нагрев поверхности твердых материалов производится подвижным непрерывным точечным источником тепла с регистрацией температуры нагреваемой поверхности одним или несколькими термоприемниками, движущимися вслед за источником тепла с той же скоростью.

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

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

Методы, основанные на теории *квазистационарного* режима [100, 133], позволяют определить комплекс ТФХ в широком интервале температур. Они предусматривают проведение эксперимента при строго линейном нагревании (охлаждении) образца исследуемого материала и имеют сравнительно большое количество разработок [38, 133, 239].

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 [38]:

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

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

$$(c\rho) = (2q R_1) / (BR_2^2),$$

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 термопары, 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 [38, 198]. 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 [38, 198, 239].

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 термопары.

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

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

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

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

Метод, основанный на решении задач о квазистационарном нагреве неограниченной пластины толщиной $2R$ с источником постоянной мощности q , использует расчетные формулы [38, 198, 239]:

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

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

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 [239].

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 [169]. Погрешность измерений составляет 5...8 %.

Для независимых измерений коэффициентов a и λ твердых полимерных и полупроводниковых материалов, теплопроводность которых не превышает 10 Вт/(м · К), в режиме монотонного разогрева образцов в интервале температур от –100 до +400 °С разработан прибор ДК-а λ -400. Погрешность измерений не превышает 5 % [169].

Универсальный прибор ДК- $a\lambda$ -400 предназначен для комплексного исследования теплофизических свойств материалов в монотонном режиме [169], 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 λ теплоизоляционных материалов до температур порядка 2000...3000 °С.

Комплексные методы также используются в методах регулярного режима [150, 241], температурных волн [92, 150], а также при сочетании квазистационарных и стационарных тепловых режимов [39].

1.2.6. Стационарные методы

Стационарные методы основаны на законе Фурье при стационарном режиме [63, 87, 107, 109, 120, 133, 134, 136, 140, 150, 175, 192–200, 219, 234, 252] и служат для определения коэффициента теплопроводности.

В стационарных методах используют основное расчетное уравнение

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

где Q – тепловой поток проходящий через слой исследуемого вещества, ограниченный двумя изотермическими поверхностями, которым соответствуют температуры t_1 и t_2 ; K – коэффициент формы слоя исследуемого материала.

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

$$K_{\text{п}} = F / \delta;$$

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

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

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

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

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

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

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

Метод плоского слоя имеет много разновидностей, что обеспечивает ему большую универсальность по исследуемым материалам от крупнодисперсных строительных плит с $\delta = 50 \dots 500$ мм до материалов

с $\delta = 1 \dots 5$ мм, при $\lambda = 0,1 \dots 5$ Вт/(м · К) и диапазону температур от -180 до $+1000$ °С.

При экспериментальном определении коэффициента λ в промышленных лабораториях используется относительный метод плоского слоя, отличающийся от абсолютного тем, что в нем последовательно с исследуемым диском устанавливается эталонный диск из материала с известным значением коэффициента теплопроводности λ_3 . В этом случае тепловой поток Q , проходящий через образец, измеряется по перепаду температуры Δt_3 в эталонном диске.

Расчет коэффициента λ осуществляется по формуле

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

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

Установки, выполненные по методу плоского слоя, рассматриваются в [101, 150, 224, 241].

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

Существуют различные разновидности конструктивного оформления метода трубы, в которых цилиндрическая труба может быть цельной или набранной из нескольких коротких колец – дисков, плотно соединенных между собой; обогрев может осуществляться с внутренней или наружной стороны. При исследовании коэффициента λ материалов при более высоких температурах (до 2500 °С) в качестве основного нагревателя используется стержень, на который надевается образец в виде нескольких колец [150, 224, 241].

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

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

Этот метод применяется главным образом для определения коэффициента теплопроводности λ дисперсных материалов порошковой и волокнистой структуры с $\lambda < 0,2$ Вт/(м · К) при температурах до 1000 °С [150, 241].

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

1.2.7. Другие методы экспериментального определения ТФХ материалов

Особого внимания заслуживают методы измерений, основанные на использовании периодического нагрева температурными волнами. Изучение распространения плоских и квазиплоских (цилиндрических, сферических) температурных волн позволило использовать данное явление для определения теплофизических характеристик твердых материалов. Задачи такого типа решены А.В. Лыковым [133, 134].

Метод режима температурных волн находит применение при определении коэффициента теплопроводности a теплоизоляционных материалов в варианте радиального нагревания цилиндрического образца [93, 150]. 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, зависящая 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 [93].

Метод использовался для исследований фторопласта, эбонита и других материалов, погрешность измерений в зависимости от конструкции опытных образцов оценивается до 5 % [150].

Информация об изменении фазы и амплитуды температурных волн вдоль образца дает возможность получать сведения о теплопроводности материала [40], а современная измерительная техника позволяет делать это с погрешностью 2 %.

Известен метод комплексного определения тепловых свойств веществ [151]. 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

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

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 спаи 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 ω – 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 температуропроводности, если известны расстояния датчиков температуры от нагревателя.

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

В экспериментах с нагревом торцевой поверхности образца путем электронной бомбардировки коэффициент температуропроводности a определяется по сдвигу фаз между колебаниями анодного тока и колебаниями температуры на обратной поверхности тонкого образца [250].

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

Для определения ТФХ веществ и материалов используют также и акустические методы [15, 77, 152, 219], основанные на термоупругих и упруго-термических явлениях. Наиболее развит из них метод изгибных колебаний пластин. Существование термоупругости приводит к появлению знакопеременного градиента температуры поперек пластины и, как следствие, к заметной диссипации механической энергии за счет потока тепла. Это проявляется в увеличении величины внутреннего трения, определяемой по ширине резонансной линии или по времени затухания свободных колебаний. Теория метода связывает частотную зависимость внутреннего трения с теплофизическими характеристиками вещества. Информация о частоте максимального внутреннего трения позволяет определить ТФХ материала.

В последние годы тенденция развития теплофизических исследований находит отражение не только в разработке новых теоретических предпосылок экспериментальных методов, но и в создании теплотехнических приборов для комплексного и раздельного определения тепловых свойств. Для определения ТФХ материалов, сотрудниками КБ теплофизического приборостроения, было создано поколение приборов с косвенным [65, 69, 115] и с прямым отсчетом измеряемых параметров [45, 72, 79, 114, 168]. 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 ТФХ веществ, материалов и изделий [2, 3, 7, 11, 14, 23, 33, 34, 36, 45, 48, 49, 50, 52, 53, 56, 57, 66, 68, 72, 81, 83, 85, 86, 91, 101, 102, 103, 104, 105, 125, 128, 131, 135, 146, 149, 153, 159, 171, 175, 177, 179, 180, 183, 185, 186, 203, 219, 224, 228, 230, 234, 248, 254] требуется знание удельного или полного теплового потока. Тепловой поток, воздействующий на исследуемый образец или материал, измеряется непосредственно ваттметром (амперметром и вольтметром), либо для этого используют тепломеры.

Измерение расхода и количества теплоты при экспериментальном определении ТФХ играет важную роль и позволяет экономить энергетические ресурсы. Прибор, измеряющий количество теплоты перенесенной теплоносителем в единицу времени, называется *тепломером* [86]. 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 [133, 134].

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 [63], 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. Коваля, М.Е. Гуревича, А.А. Степкина [66] 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, то есть незначительно уступает лучшим сплавным термопарам. Однако технологические и метрологические характеристики таких ПТП пока не исследованы.

Термоэлектрический измеритель теплового потока [203] состоит из усилителя постоянного тока и датчика теплового потока выполненного из монокристаллов висмута, что позволило получить постоянство его чувствительности в широком температурном диапазоне. Прибор может использоваться для измерения теплового потока при тепловом контакте с измерителем и радиационной его составляющей при фиксированном удалении датчика от источника теплового потока.

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

Современное состояние развития теплотрии потребовало изучения и зарубежного опыта. В Англии выпускается измеритель теплового потока, размещаемый в ячейке объемом 15 см³ [262]. 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 [275]. 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 с батареей и VD5.

Фирмой Kundo (Германия) разработан электронный тепломер НКVE 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 от наружных строительных ограждений.

1.2.9. Анализ обзора экспериментальных методов определения ТФХ материалов

Анализ предшествующих исследований экспериментального определения коэффициентов теплопроводности, 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 ТФХ, 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 [57, 59, 60].

Следовательно, оптимальным методом для экспериментального определения ТФХ строительных и теплоизоляционных материалов является неразрушающий метод, исключающий 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.

1.3. ВЫВОДЫ

В настоящее время предусматривается использование принципиально новых строительных, теплоизоляционных, облицовочных материалов, разработанных инженерами и учеными. Соответственно возрастает потребность в информации о свойствах готовых изделий в широком диапазоне состояний. Строительным, теплоизоляционным, облицовочным материалам свойственен ряд особенностей, связанных с изучением тепловых и механических свойств на образцах, выполненных в виде призмы квадратного сечения. Определяя экспериментально коэффициенты теплопроводности, объемной теплоемкости, теплопроводности материалов, можно оптимизировать теплотехнические характеристики ограждающих конструкций, контролировать энергосбережение и получать более благоприятные экологические условия.

Анализ состояния вопроса и предшествующие исследования по экспериментальному определению ТФХ материалов позволяют сделать следующие выводы.

1. В литературе можно встретить ряд методов, позволяющих определять теплофизические характеристики указанных материалов. Эти методы обладают своими преимуществами и недостатками. К недостаткам относятся: необходимость создания постоянного теплового потока, проведение экспери-

мента в обстановке капельной среды при постоянной ее температуре, малые геометрические размеры исследуемых образцов.

При использовании таких методов, как квазистационарный, импульсный, монотонного и периодического нагрева, термоупругих явлений требуется сложное и дорогостоящее оборудование. В большинстве методов датчики температур устанавливаются внутри объема образца. Это тоже связано с рядом трудностей, так как расположение термодпар в центральной части геометрического тела нарушает целостность образца.

2. Исследованиями ЛИТМО, ИТМО, МЭИ, ТГТУ, ВолгГАСУ установлено, что перспективным направлением в развитии методов для определения ТФХ веществ и материалов является создание быстродействующих неразрушающих методов измерения и контроля.

3. Наиболее приемлемым способом определения температуропроводности, теплоемкости, теплопроводности строительных, теплоизоляционных, облицовочных материалов является способ, исключаяющий влияние внешних условий на процесс исследования и основанный на измерениях температур на поверхности призмы квадратного сечения при ее симметричном нагревании или охлаждении методом неразрушающего контроля.

2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРОПРОВОДНОСТИ МАТЕРИАЛОВ ПО ТЕМПЕРАТУРНЫМ ИЗМЕРЕНИЯМ НА ПОВЕРХНОСТИ ПРИЗМЫ КВАДРАТНОГО СЕЧЕНИЯ

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

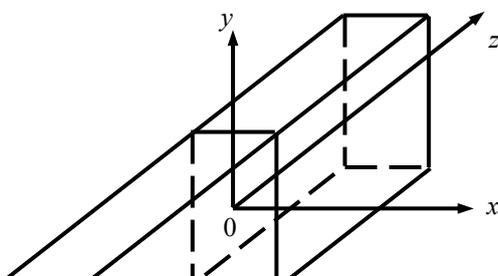
Смысл предлагаемого лучше всего пояснить на примере симметричного нагревания призмы прямоугольного сечения бесконечной длины с начальной температурой T_0 и размерами сторон $2R_A \times 2R_B$ (рис. 2.1.1).

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)

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



Ошибка!

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 β_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 [28, 133]:

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

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

$$\frac{\partial^2 T(x, y, \tau)}{\partial x^2} = (T_c - T_0) \sum_{n=1}^{\infty} D_n \frac{\mu_n^2}{R_A^2} \cos\left(\mu_n \frac{x}{R_A}\right) \times$$

$$\times e^{-\mu_n^2 \frac{\alpha \tau}{R_A^2}} \sum_{m=1}^{\infty} D_m \cos\left(\mu_m \frac{y}{R_B}\right) e^{-\mu_m^2 \frac{\alpha \tau}{R_B^2}}; \quad (2.1.7)$$

$$\frac{\partial^2 T(x, y, \tau)}{\partial y^2} = (T_c - T_0) \sum_{n=1}^{\infty} D_n \cos\left(\mu_n \frac{x}{R_A}\right) \times$$

$$\times e^{-\mu_n^2 \frac{\alpha \tau}{R_A^2}} \sum_{m=1}^{\infty} D_m \frac{\mu_m^2}{R_B^2} \cos\left(\mu_m \frac{y}{R_B}\right) e^{-\mu_m^2 \frac{\alpha \tau}{R_B^2}}. \quad (2.1.8)$$

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

- центра ($x = y = 0$)

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

- поверхности x ($x = R_A; y = 0$)

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

- поверхности y ($x = 0; y = R_B$)

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

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

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

По значениям критериев подобия $Bi_A = 1$, $Bi_B = 2$, $Bi_C = 1,5$ и корням характеристического уравнения μ_n и μ_m , а также значениям постоянных D_n и D_m [133], приведенным в таблице 2.1.1, рассчитаем значения составляющих градиента теплового потока β_y (табл. 2.1.2 – 2.1.4) для различных вариантов.

2.1.1. Корни характеристического уравнения и значения постоянных

Член ряда	$Bi_A = 1$		$Bi_B = 2$		$Bi_C = 1,5$	
	D_n	μ_n	D_m	μ_m	D_m	μ_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 β_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 β_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 β_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 τ (рис. 2.1.2). Это происходит потому, что в области регулярного режима

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 μ_{1A} и μ_{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 β_y не зависит от критерия Фурье, а является функцией Bi_A и Bi_B и отношениями между измерениями сторон призмы R_A и R_B во второй степени. При R_B стремящемся к R_A , призма принимает форму квадратного сечения, а значение β_y начинает стремиться к своему предельному значению, равному единице. Отношение составляющих градиента теплового потока β_y (когда $R_A = R_B$) при лучистом нагреве призмы квадратного сечения также равно единице в области упорядоченного теплового периода. Этот же результат получается при симметричном нагреве призмы квадратного сечения 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:

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

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

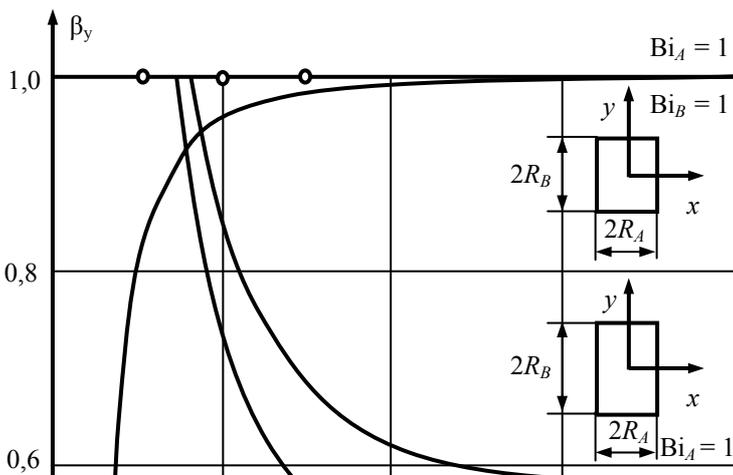


Рис. 2.1.2. График изменения параметра β_y , когда на границах призмы действует конвективный тепловой поток ($Bi_A = 1$; $Bi_B = 1,5$; $Bi_C = 2$):

—○— — параметр β_y для центра;
 — — параметр β_y для поверхности

$$T(R, y, \tau) = T_{\Pi}(y, \tau); \quad (2.1.17)$$

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

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:

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

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

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

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

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

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

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:

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

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:

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

которые 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 произ-

вольно 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:

$$\theta = \frac{T}{T_c}; \quad \theta_n = \frac{T_n}{T_c}; \quad \theta_0 = \frac{T_0}{T_c}; \quad X = \frac{x}{R};$$

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

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

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

$$\frac{\partial \theta}{\partial Fo} = 2 \frac{\partial^2 \theta}{\partial X^2}; \tag{2.2.7}$$

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

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

$$\theta(X; 0) = \theta_0. \tag{2.2.10}$$

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

$$\theta = f(X; Fo; \theta_0; Bi; Ki). \tag{2.2.11}$$

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 ТЕПЛОВОГО 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 [98]. 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 [41, 42, 193]:

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

которое для упорядоченной части процесса ограничивается только первым членом ряда и имеет вид [41, 193]:

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

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 [193]. 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 $\Delta\theta$

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

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

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

Интегрируя последнее выражение и обозначив тождество символом Φ , получим

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

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 ΔT – 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 термопары 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, то есть когда температурный комплекс Φ начнет изменяться во времени по закону прямой линии.

2.4. СООТВЕТСТВИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ УПОРЯДОЧЕННОГО ТЕПЛООВОГО РЕЖИМА В ПРИЗМЕ КВАДРАТНОГО СЕЧЕНИЯ ГРАНИЧНЫМИ УСЛОВИЯМ, ВЫРАЖЕННЫМИ КОНВЕКТИВНЫМИ, ЛУЧИСТЫМ И СУММАРНЫМИ ТЕПЛОВЫМИ ПОТОКАМИ

РАССМОТРИМ РАСЧЕТНЫЕ ТОЧКИ В ПРИЗМЕ КВАДРАТНОГО СЕЧЕНИЯ, ПОКАЗАННЫЕ НА РИС. 2.4.1: I \equiv (X = Y = 0); II \equiv (X = R; Y = 0); III \equiv (X = 0, Y = 0,5R); IV \equiv (X = R; Y = 0,5R); V \equiv (X = 0; Y = R); VI \equiv (X = R, Y = R).

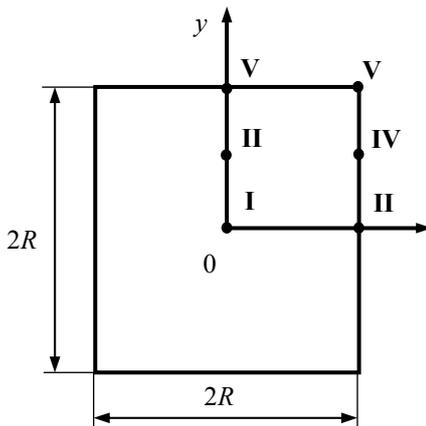


Рис. 2.4.1. Расчетные точки призмы квадратного сечения:

- I \equiv (x = y = 0);
- II \equiv (x = R; y = 0);
- III \equiv (x = 0, y = 0,5R);
- IV \equiv (x = R; y = 0,5R);
- V \equiv (x = 0; y = R);
- VI \equiv (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:

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

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

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

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,

$$f(\theta_n) = \text{Bi} (1 - \theta_n),$$

то температурное поле в области упорядоченного теплового режима может быть описано известным распределением [133]:

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

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:

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

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

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

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

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

В константу входят постоянные значения T_c , T_0 , D_1 , μ_1 . Непосредственная подстановка (2.4.5) – (2.4.8) в выражение (2.4.1) дает

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

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 μ_1 и функции $\cos(\mu_1)$ приведены в табл. 2.4.1.

Таблица 2.4.1

Bi	μ_1	$\cos \mu_1$	μ_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

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 закономерность (2.4.2), (2.4.3) также подтверждает правильность этих уравнений при любых значениях критерия конвективного теплообмена Bi .

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 [18, 28, 41, 42]. 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 :

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

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 М в промежуток времени τ .

Тепло, передаваемое внутри 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 Δx ,

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

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

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

$$\theta_{N;Fo+\Delta Fo} = \theta_{N;Fo} + \Delta Fo \cdot M^2 (\theta_{N+Y;Fo} + \theta_{N-Y;Fo} + 2\theta_{N-X;Fo} - 4\theta_{N;Fo}) + 2\Delta Fo \cdot M \cdot \text{Ki} (1 - \theta_{N;Fo}^4). \quad (2.4.13)$$

Расчет температурного поля выполнялся не для всего сечения, а только для восьмой части призмы квадратного сечения, так как задача симметричная. При этом значение М 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:

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

При этом расчетный интервал времени ΔFo принимался 0,00125.

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

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

целесообразно воспользоваться имеющимися в технической литературе числовыми данными, полученными на ЭВМ [27, 42, 209, 214].

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 θ от значений критерия Fo в точках I–VI при нагревании призмы квадратного сечения суммарным тепловым потоком.

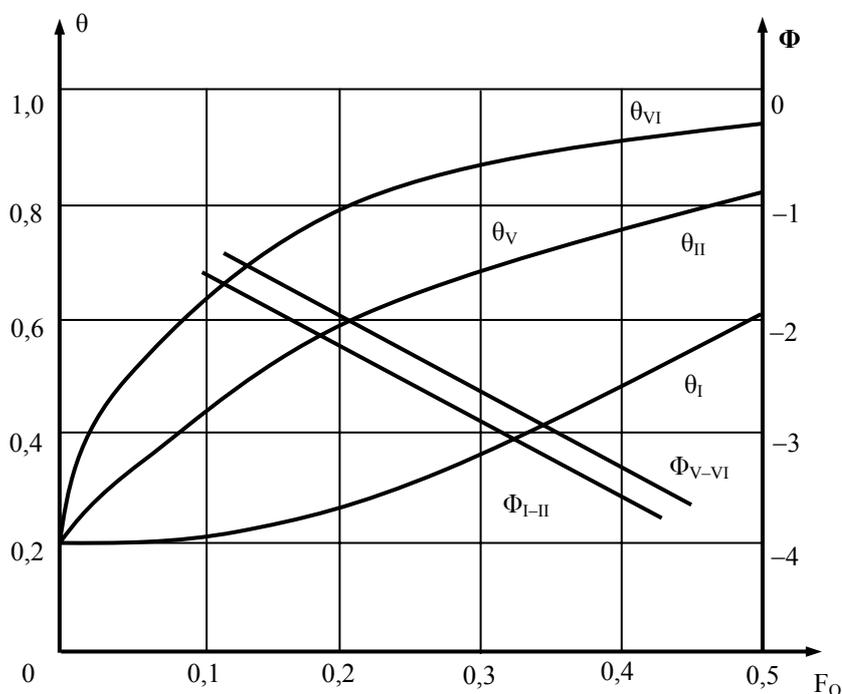


Рис. 2.4.2. Нагрев призмы квадратного сечения суммарным потоком тепла ($Ki = 0,5$; $Bi = 0,5$; $\theta_0 = 0,2$):

$\theta_I, \theta_{II}, \theta_V, \theta_{VI}$ – данные ЭВМ; Φ_{I-II}, Φ_{V-VI} – результаты расчета закономерности по формулам (2.4.14) и (2.4.16)

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 линии Φ 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 [100] более удобно использовать в конечно-разностной форме

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

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

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

где $T_{\text{ц}}$, $T_{\text{п}}$ – температуры центра и поверхности тела; T_0 – начальная температура тела.

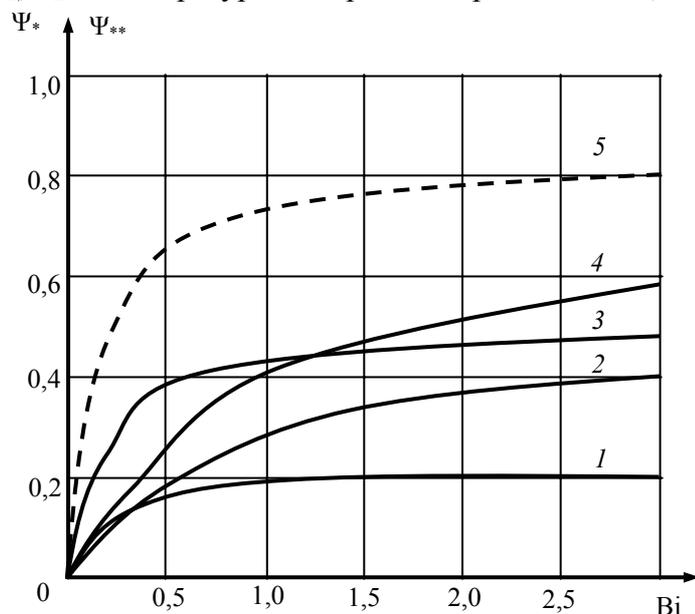


Рис. 2.5.1. График зависимости отношения Ψ_* и Ψ_{} (---) от критерия теплообмена Bi для тел различной формы:**

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

Используя способ оценки приближения [133], можно подметить закономерность изменения отношения Ψ_* 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 Ψ_* на этих графиках гарантирует наступление начала регулярного периода нагревания с погрешностью в 1 %.

Анализ максимальных значений Ψ_* 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 ξ 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 термопары 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.

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, то есть 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 также служат отношения (2.5.2) и (2.5.4), а функции Ψ_* и Ψ_{**} стремятся к тем же конечным пределам при бесконечно большой интенсификации процесса теплообмена на границе.

Значение функции Ψ_{**} отчетливо наблюдается на примерах нестационарного распространения тепла в призме квадратного сечения под внешним воздействием лучистого теплового потока. На основе данных ЭВМ [42] для лучистого нагрева призмы квадратного сечения видно, что для любого радиационного числа K_i , θ_0 и F_0 есть пара числовых значений θ_V – середины грани и θ_{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 нагревания 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.

2.6. ВЫВОДЫ

1. В практических условиях весьма часто приходится встречаться со строительными и теплоизоляционными материалами, выполненными в виде призмы квадратного сечения. Математические исследования позволили получить закономерность упорядоченного теплового режима (2.3.13) в призме квадратного сечения бесконечной длины при любых симметричных условиях теплообмена на границе.

2. Достоверность закономерности упорядоченного теплового режима подтверждается для случаев нагрева призмы конвективным, лучистым и суммарным потоками тепла и была показана высокая степень ее согласования при большом числе сочетаний критериев теплообмена Ki и Bi .

3. Теоретические исследования позволяют рекомендовать закономерность упорядоченного теплового режима (2.4.1) – (2.4.3) для экспериментального определения коэффициента температуропроводности строительных и теплоизоляционных материалов на образцах, выполненных в виде призмы квадратного сечения.

4. Проведение опытов для определения коэффициента температуропроводности не требует измерений таких физических величин, как температура окружающей среды, коэффициент теплообмена, степень черноты. Нет необходимости в предварительном определении коэффициента теплопроводности вещества. Отпадает необходимость в создании чисто конвективной или чисто лучистой окружающей среды, что сильно упрощает условия проведения эксперимента (экспериментальную установку) и повышает метрологический уровень результатов измерения.

5. Установлено наступление упорядоченного теплового режима, которое гарантировано с погрешностью порядка 1 % для тел различной формы (призмы квадратного сечения, куба, шара, пластины, стержня). При симметричном нагревании призмы квадратного сечения оно может быть установлено по температурам ребра, середины грани призмы и начальной температуре.

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 ТЕПЛОВОГО 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 [98]. 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 [41, 42, 193]:

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

которое для упорядоченной части процесса ограничивается только первым членом ряда и имеет вид [41, 193]:

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

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 [193]. 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 $\Delta\theta$

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

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

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

Интегрируя последнее выражение и обозначив тождество символом Φ , получим

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

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 ΔT – 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, то есть когда температурный комплекс Φ начнет изменяться во времени по закону прямой линии.

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

РАССМОТРИМ РАСЧЕТНЫЕ ТОЧКИ В ПРИЗМЕ КВАДРАТНОГО СЕЧЕНИЯ, ПОКАЗАННЫЕ НА РИС. 2.4.1: I \equiv (X = Y = 0); II \equiv (X = R; Y = 0); III \equiv (X = 0, Y = 0,5R); IV \equiv (X = R; Y = 0,5R); V \equiv (X = 0; Y = R); VI \equiv (X = R, Y = R).

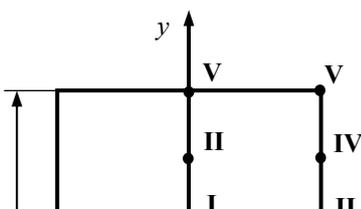


Рис. 2.4.1. Расчетные точки призмы квадратного сечения:

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

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:

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

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

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

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 [133]:

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

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:

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

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

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

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

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

В константу входят постоянные значения T_c , T_0 , D_1 , μ_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 μ_1 и функции $\cos(\mu_1)$ приведены в табл. 2.4.1.

Таблица 2.4.1

Bi	μ_1	$\cos \mu_1$	μ_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

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 закономерность (2.4.2), (2.4.3) также подтверждает правильность этих уравнений при любых значениях критерия конвективного теплообмена Bi .

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 [18, 28, 41, 42]. 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

$$g_l = g_\tau + g_c.$$

Лучистый поток тепла, поступающий на поверхность призмы равен

$$g_l = \sigma_l (T_c^4 - T_{M,\tau}^4),$$

где σ_l – постоянная излучения тела; T_c – температура среды, откуда поступает тепло; T_M – температура в слое M в промежуток времени τ .

Тепло, передаваемое внутрь тела за счет теплопроводности,

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

Тепло, расходуемое на нагрев элементарного слоя Δx ,

$$g_c = \frac{1}{2} (c\rho) \Delta x (T_{M,\tau+\Delta\tau} - T_{M,\tau}).$$

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

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

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

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 ΔFo принимался 0,00125.

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

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

целесообразно воспользоваться имеющимися в технической литературе числовыми данными, полученными на ЭВМ [27, 42, 209, 214].

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 θ от значений критерия Fo в точках I–VI при нагревании призмы квадратного сечения суммарным тепловым потоком.

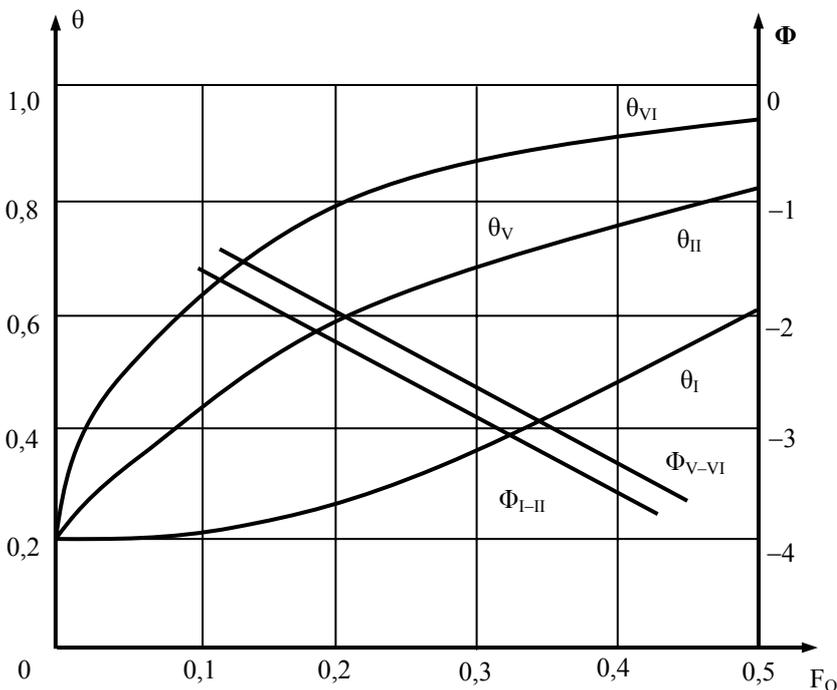


Рис. 2.4.2. Нагрев призмы квадратного сечения суммарным потоком тепла ($Ki = 0,5$; $Vi = 0,5$; $\theta_0 = 0,2$):

$\theta_I, \theta_{II}, \theta_V, \theta_{VI}$ – данные ЭВМ; Φ_{I-II}, Φ_{V-VI} – результаты расчета закономерности по формулам (2.4.14) и (2.4.16)

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 линии Φ 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 Vi 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 ТЕПЛОВОГО ПЕРИОДА

В ряде случаев выражение регулярного теплового режима [100] более удобно использовать в конечно-разностной форме

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

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.

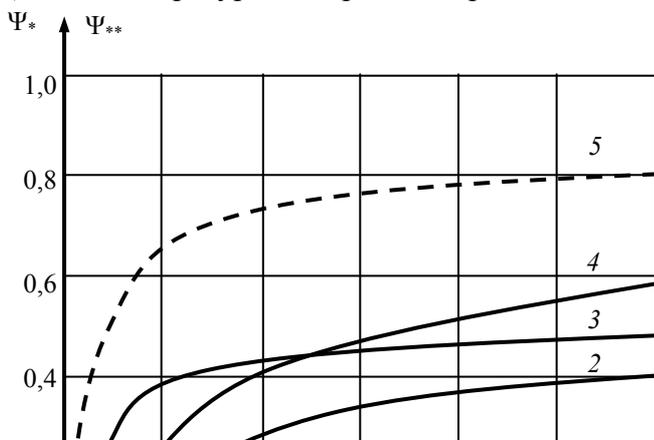


Рис. 2.5.1. График зависимости отношения Ψ_* и Ψ_{} (---) от критерия теплообмена Bi для тел различной формы:**

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

Используя способ оценки приближения [133], можно подметить закономерность изменения отношения Ψ_* 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 Ψ_* на этих графиках гарантирует наступление начала регулярного периода нагревания с погрешностью в 1 %.

Анализ максимальных значений Ψ_* 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 ξ 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.

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, то есть 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 также служат отношения (2.5.2) и (2.5.4), а функции Ψ_* и Ψ_{**} стремятся к тем же конечным пределам при бесконечно большой интенсификации процесса теплообмена на границе.

Значение функции Ψ_{**} отчетливо наблюдается на примерах нестационарного распространения тепла в призме квадратного сечения под внешним воздействием лучистого теплового потока. На основе данных ЭВМ [42] для лучистого нагрева призмы квадратного сечения видно, что для любого радиационного числа K_i , θ_0 и F_0 есть пара числовых значений θ_V – середины грани и θ_{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 нагревания 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 термодатчиком в центральную часть объема образца.

2.6. ВЫВОДЫ

6. В практических условиях весьма часто приходится встречаться со строительными и теплоизоляционными материалами, выполненными в виде призмы квадратного сечения. Математические исследования позволили получить закономерность упорядоченного теплового режима (2.3.13) в призме квадратного сечения бесконечной длины при любых симметричных условиях теплообмена на границе.

7. Достоверность закономерности упорядоченного теплового режима подтверждается для случаев нагрева призмы конвективным, лучистым и суммарным потоками тепла и была показана высокая степень ее согласования при большом числе сочетаний критериев теплообмена K_i и Bi .

8. Теоретические исследования позволяют рекомендовать закономерность упорядоченного теплового режима (2.4.1) – (2.4.3) для экспериментального определения коэффициента температуропроводности строительных и теплоизоляционных материалов на образцах, выполненных в виде призмы квадратного сечения.

9. Проведение опытов для определения коэффициента температуропроводности не требует измерений таких физических величин, как температура окружающей среды, коэффициент теплообмена, степень черноты. Нет необходимости в предварительном определении коэффициента теплопроводности вещества. Отпадает необходимость в создании чисто конвективной или чисто лучистой окружающей среды, что сильно упрощает условия проведения эксперимента (экспериментальную установку) и повышает метрологический уровень результатов измерения.

10. Установлено наступление упорядоченного теплового режима, которое гарантировано с погрешностью порядка 1 % для тел различной формы (призмы квадратного сечения, куба, шара, пластины, стержня). При симметричном нагревании призмы квадратного сечения оно может быть установлено по температурам ребра, середины грани призмы и начальной температуре.

3. МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕМПЕРАТУРОПРОВОДНОСТИ МАТЕРИАЛОВ ПО ТЕМПЕРАТУРНЫМ ИЗМЕРЕНИЯМ НА ПОВЕРХНОСТИ ПРИЗМЫ КВАДРАТНОГО СЕЧЕНИЯ

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.

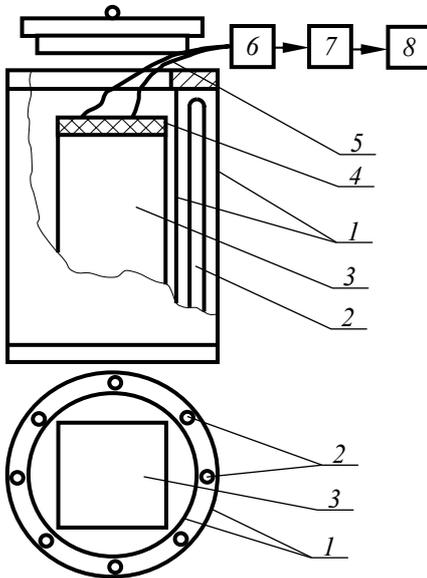


Рис. 3.1.1. Схема

экспериментальной установки:

- 1 – внутренний и наружный экраны (полые цилиндры); 2 – коаксиальные нагреватели; 3 – исследуемый образец; 4 – тепловая изоляция; 5 – термопары; 6 – коммутатор; 7 – усилитель; 8 – ЭВМ

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 шестнадцати 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 заполнителем (цемент – 400 кг/м³; тонкомолотая шамотная добавка – 80 кг/м³; шамотный песок – 740 кг/м³; шамотный щебень – 600 кг/м³; 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 поверку 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);

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 возможно увеличение погрешностей измерений температур, изменения расстояния между термопарами и др.

В этом первом варианте нагрев образца (призмы квадратного сечения) в экспериментальной установке возможен одним из двух любых способов.

1.1. В предварительно прогретую экспериментальную установку, когда вначале установка без образца прогревается 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.

1.2. 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 ≈ 20 °С. Единственным условием 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 производилось 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 τ . 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 Φ 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 Φ вычисляется для соответствующего сечения призмы по формулам:

- для сечения I–II

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

- 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 Φ вычисляется:

- 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 возможно два варианта расчета.

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 выполняется графическое построение температур для соответствующего сечения $T = f(\tau)$. По формулам (3.2.1) – (3.2.6) вычисляется температурный комплекс Φ и на этом же графике выполняется графическое построение температурного комплекса $\Phi = f(T, \tau)$. Примеры расчета температурных комплексов Φ приведены в приложении.

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

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

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; Φ – температурный комплекс, определяемый на основе закономерностей упорядоченного теплового режима (3.2.1) – (3.2.6) для каждого значения времени τ ; $\Delta\Phi / \Delta\tau$ – 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 во времени температурам T_I , T_{II} , T_{III} , T_{IV} , T_V , T_{VI} в соответствующих точках призмы квадратного сечения для каждого сечения призмы по формулам (3.2.1) – (3.2.6) вычисляется температурный комплекс Φ_{I-II} , Φ_{III-IV} или Φ_{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 Φ (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 τ . В процессе математических расчетов в таблицах программы Excel коэффициент температуропроводности a будет повторять свои истинные значения в определенном промежутке времени τ , что и соответствует упорядоченному тепловому режиму в призме квадратного сечения. Расчетные таблицы программы Excel для определения коэффициента температуропроводности различных материалов приведены в приложении.

Абсолютной оценкой регулярной части процесса нагревания или охлаждения в любом рассматриваемом сечении внутри призмы квадратного сечения должно служить соотношение Ψ_* , 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 Φ при $2R = 90$ мм становится минимальной ввиду большего значения избыточных температур ΔT , входящих в закономерности (3.2.1) – (3.2.6). Погрешность расчета коэффициента температуропроводности в этом случае также становится минимальной ввиду большего 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 $\approx 80 \dots 100$ °С), 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 Φ_{I-II} , Φ_{III-IV} и Φ_{V-VI} , вычисленные соответственно для каждого сечения призмы по формулам (3.2.1) – (3.2.3).

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

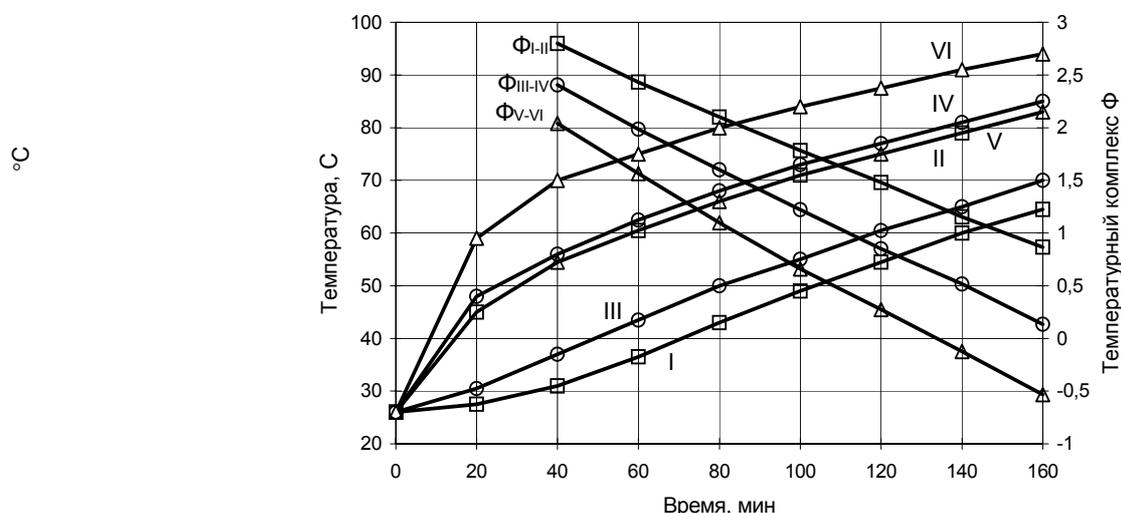


Рис. 3.3.1. Нагрев призмы квадратного сечения из оргстекла ($2R = 90$ мм) суммарным потоком тепла:

I, II, III, IV, V, VI – значения температур в соответствующих точках сечения призмы, определяемые экспериментально; Φ_{I-II} , Φ_{III-IV} , Φ_{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 графике (рис. 3.3.1) наносятся экспериментальные температуры $T = f(\tau)$. По формулам (3.2.1) – (3.2.3) вычисляется температурный комплекс Φ_{I-II} , Φ_{III-IV} и Φ_{V-VI} и на этом же графике выполняется графическое построение температурных комплексов $\Phi = f(T, \tau)$. Примеры расчета температурных комплексов Φ приведены в табл. 1П – 3П.

Визуально выявляется участок прямой линии температурного комплекса Φ_{I-II} , Φ_{III-IV} и Φ_{V-VI} . Угловым коэффициентом $\Delta\Phi / \Delta\tau$ каждой построенной прямой линии Φ для соответствующего сечения призмы I–II, III–IV и V–VI согласно закономерностей 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 Φ_{I-II} , Φ_{III-IV} , Φ_{V-VI} выходят на прямую линию в диапазоне $\tau = 80 \dots 120$ мин, а угловым коэффициентом $\Delta\Phi / \Delta\tau$ каждой отдельной построенной прямой линии становится постоянным. Используя графические построения Φ и 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 во времени температурам $T_I, T_{II}, T_{III}, T_{IV}, T_V, T_{VI}$ в соответствующих точках призмы квадратного сечения по формулам (3.2.1) – (3.2.3) вычисляется температурный комплекс $\Phi_{I-II}, \Phi_{III-IV},$ и Φ_{V-VI} , для каждого сечения призмы. В табл. 1П – 3П представлены экспериментальные распределения температур при нагревании призмы из оргстекла в соответствующих сечениях I–II, III–IV, V–VI. 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} , полученные на основе эксперимента в определенные промежутки времени τ .

Из представленных математических вычислений и таблиц программы Excel 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 Φ (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 должно служить соотношение Ψ_* и Ψ_{**} , 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 Ψ_* и Ψ_{**} .

Для сечения I–II (табл. 1П и 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 из табл. 1П программы Excel 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 (табл. 3П и 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, из табл. 3П программы Excel 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 при нагревании призмы квадратного сечения из оргстекла ($2R = 90$ мм) в предварительно прогретой установке. Обработка результатов всех экспериментов производилась в соответствии с существующими рекомендациями [50, 53, 75, 111, 138, 142, 150, 253].

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.

В табл. 4П представлены экспериментальные распределения температур по поверхности призмы из оргстекла в соответствующем сечении V–VI, а также результаты расчетов температурного комплекса Φ и коэффициента температуропроводности оргстекла. В таблицу программы Excel вводятся только значения температур T_V и T_{VI} , полученные на основе эксперимента в определенные промежутки времени τ . Численное значение коэффициента температуропроводности a материала вычисляется по формуле (3.2.7).

В процессе математических расчетов из табл. 4П программы Excel 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 из табл. 4П 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 ≈ 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 Φ_{I-II} , Φ_{III-IV} , Φ_{V-VI} , вычисленные соответственно для каждого сечения призмы по формулам (3.2.4) – (3.2.6).

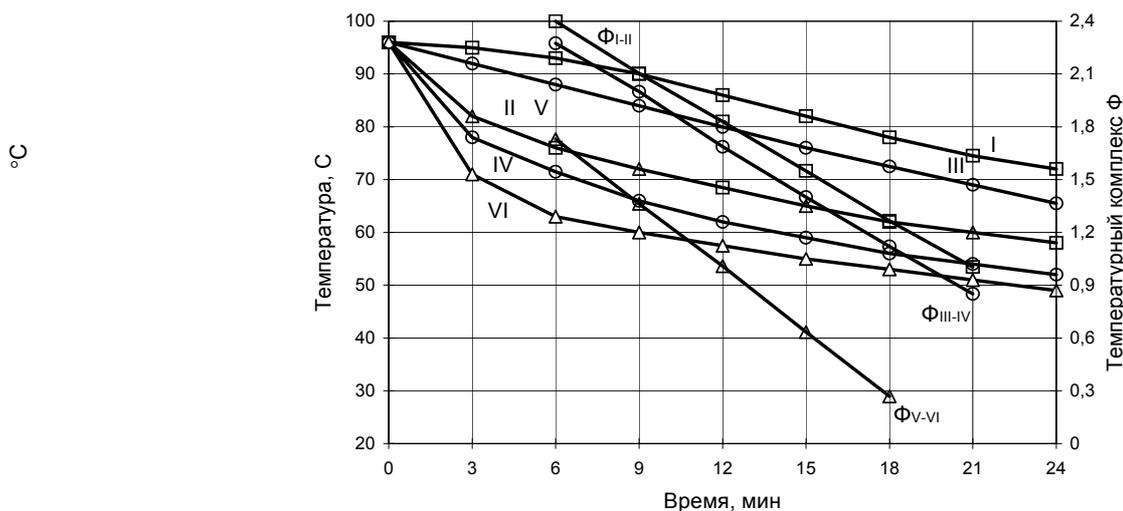


Рис. 3.3.2. Охлаждение призмы квадратного сечения из оргстекла ($2R = 40$ мм) на воздухе:

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

Φ_{I-II} , Φ_{III-IV} , Φ_{V-VI} – температурные комплексы, вычисленные по формулам (3.2.4) – (3.2.6)

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

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 графике (рис. 3.3.2) наносятся экспериментальные температуры $T = f(\tau)$. По формулам (3.2.4) – (3.2.6) вычисляется температурный комплекс Φ_{I-II} , Φ_{III-IV} и Φ_{V-VI} и на этом же графике выполняется графическое построение температур-

ных комплексов $\Phi = f(T, \tau)$. Примеры расчета температурных комплексов Φ при охлаждении призмы квадратного сечения из оргстекла приведены в табл. 5П – 7П.

Визуально выявляется участок прямой линии температурного комплекса Φ_{I-II} , Φ_{III-IV} или Φ_{V-VI} . Угловой коэффициент $\Delta\Phi / \Delta\tau$ каждой построенной прямой линии для соответствующего сечения призмы I–II, III–IV или V–VI согласно закономерностей 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 $\tau = 6 \dots 91$ мин начинается упорядоченный тепловой режим, угловой коэффициент $\Delta\Phi / \Delta\tau$ каждой отдельной построенной прямой линии становится постоянным и каждый температурный комплекс Φ_{I-II} , Φ_{III-IV} , Φ_{V-VI} выходит на прямую линию.

Используя графические построения Φ и 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 во времени температурам $T_I, T_{II}, T_{III}, T_{IV}, T_V, T_{VI}$ в соответствующих точках призмы квадратного сечения по формулам (3.2.4) – (3.2.6) вычисляется температурный комплекс Φ_{I-II} , Φ_{III-IV} , и Φ_{V-VI} для каждого сечения призмы. В табл. 5П – 7П представлены экспериментальные распределения температур при охлаждении призмы из оргстекла в соответствующих сечениях I–II, III–IV, V–VI. 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} , полученные на основе эксперимента в определенные промежутки времени τ .

Из представленных математических вычислений и таблиц программы Excel 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 Φ (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 должно служить соотношение Ψ_* и Ψ_{**} , 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 Ψ_* и Ψ_{**} .

Для сечения I–II (табл. 5П и 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, из табл. 5П программы Excel 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 (табл. 6П и 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 из табл. 6 (прил.) программы Excel 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 (табл. 7П и 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 из табл. 7П программы Excel 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 [50, 53, 75, 111, 138, 142, 150, 253].

Для подтверждения надежности полученных данных блочное оргстекло дополнительно исследовали во Всесоюзном научно-исследовательском институте метрологии им. Д.И. Менделеева (г. Санкт-Петербург). По результатам метрологической аттестации и исследования удельной теплоемкости и теплопроводности была подтверждена температуропроводность, которая соответственно для блочного оргстекла

$$a = 0,115 \cdot 10^{-6}, \text{ м}^2/\text{с}.$$

3.4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕМПЕРАТУРОПРОВОДНОСТИ ФТОРОПЛАСТА

Для экспериментального определения коэффициента температуропроводности a фторопласта возможен один из четырех любых вариантов, подробно изложенных в разд. 3.2 и 3.3.

По *первому возможному варианту проведения эксперимента* – призму квадратного сечения из фторопласта ($2R = 28$ мм) вначале помещали в установку с начальной комнатной температурой, а затем включали нагреватель и прогревали экспериментальную установку вместе с образцом.

На рис. 3.4.1 приведены результаты экспериментального распределения температур в точках V и VI при нагревании призмы квадратного сечения из фторопласта ($2R = 28$ мм), а также построен график температурного комплекса Φ_{V-VI} , вычисленного по формуле (3.2.3).

В табл. 8П представлены экспериментальные распределения температур при нагревании призмы из фторопласта в сечении V–VI. В таблицу программы Excel вводятся только значения температур T_V и T_{VI} , полученные на основе эксперимента в определенные промежутки времени τ .

Из представленных математических вычислений и таблиц программы Excel видно, что при симметричном нагревании призмы квадратного сечения из фторопласта ($2R = 28$ мм) с определенного времени

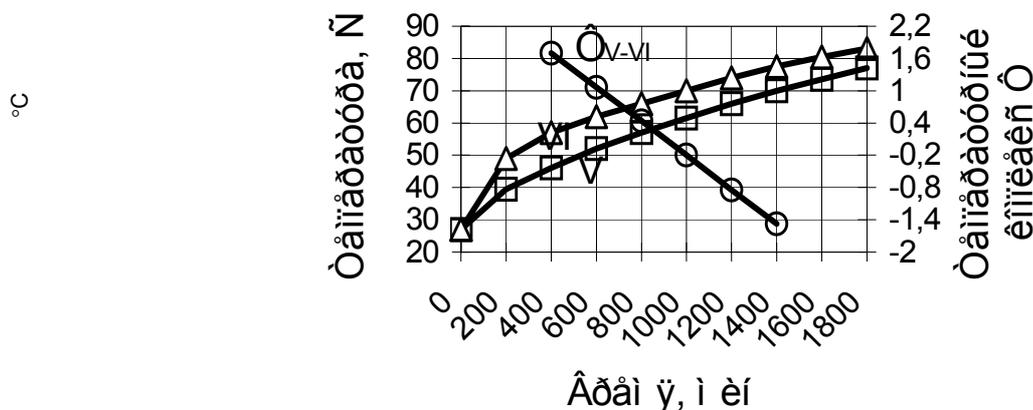


Рис. 3.4.1. Нагрев призмы квадратного сечения из фторопласта ($2R = 28$ мм) суммарным потоком тепла:
V, VI – значения температур по сечению призмы;
 Φ_{V-VI} – температурный комплекс, вычисленный по формуле (3.2.3)

$\tau = 400$ с начинается упорядоченный тепловой режим, угловой коэффициент $\Delta\Phi / \Delta\tau$ становится постоянным, а температурный комплекс Φ выходит на прямую линию. Численное значение коэффициента температуропроводности a фторопласта вычисляется по формуле (3.2.7).

В процессе математических расчетов из табл. 8П программы Excel видно, что для сечения V–VI в диапазоне $\tau = 600 \dots 1600$ с коэффициент температуропроводности a фторопласта повторяет свои истинные значения, что соответствует упорядоченному тепловому режиму в призме квадратного сечения.

Для сечения V–VI ($R_* = 0,0135$ м) в диапазоне $\tau = 600 \dots 1600$ с

$$a = \frac{R_*^2}{4,94} \frac{\Delta\Phi}{\Delta\tau} = \frac{(0,0135)^2 \cdot [(1,06 - (-2,04))]}{4,94 \cdot 1000} = 0,114 \cdot 10^{-6}, \text{ м}^2/\text{с}.$$

Абсолютной оценкой начала регулярной части процесса нагревания в сечении V–VI призмы должно служить соотношение Ψ_{**} , определяемое по (3.2.12). Для призмы квадратного сечения из фторопласта ($2R = 28$ мм) при ее начальной температуре $T_0 = 27$ °С наступление упорядоченного теплового режима определяется по соотношению Ψ_{**} .

Для сечения V–VI (табл. 8П и рис. 3.4.1):

- при $\tau = 800$ с

$$\Psi_{**} = (T_V - T_0) / (T_{VI} - T_0) = (57 - 27) / (66 - 27) = 0,77;$$

- при $\tau = 1000$ с

$$\Psi_{**} = (T_V - T_0) / (T_{VI} - T_0) = (61,5 - 27) / (70 - 27) = 0,8.$$

Следовательно, для сечения V–VI, начиная со времени $\tau = 870$ с, наступил (с погрешностью порядка 1 %) упорядоченный тепловой режим, так как при $\tau = 1000$ с, $\Psi_{**} = 0,8 > 0,78$.

По второму возможному варианту проведения эксперимента – охлаждение призмы квадратного сечения из фторопласта ($2R = 28$ мм), когда экспериментальную установку одновременно с призмой из фторопласта прогревали до термодинамического равновесия, а затем нагретый образец охлаждали на воздухе при комнатной температуре и естественной конвекции.

На рис. 3.4.2 приведены результаты экспериментального распределения температур в точках V и VI при охлаждении призмы квадратного сечения из фторопласта ($2R = 28$ мм), а также построен график температурного комплекса Φ_{V-VI} , вычисленного по формуле (3.2.6).

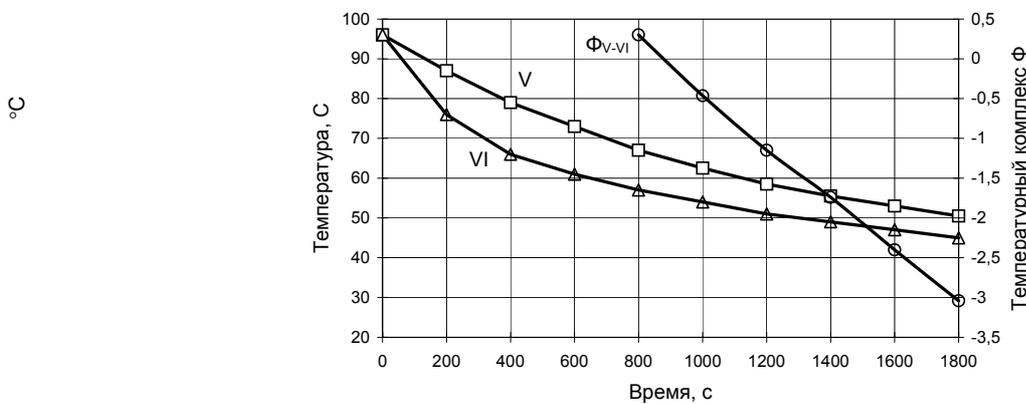


Рис. 3.4.2. Охлаждение призмы квадратного сечения из фторопласта ($2R = 28$ мм) на воздухе:

V, VI – значения температур по сечению призмы;

Φ_{V-VI} – температурный комплекс, вычисленный по формуле (3.2.6)

По формуле (3.2.6) вычисляется температурный комплекс Φ_{V-VI} и на этом же графике выполняется графическое построение температурного комплекса $\Phi = f(T, \tau)$. Визуально выявляется участок прямой линии температурного комплекса Φ_{V-VI} . Угловым коэффициентом построенной прямой линии $\Delta\Phi / \Delta\tau$ для сечения призмы V–VI согласно закономерности упорядоченного теплового режима (2.4.3) численно равен множителю $(4,94 a) / R^2$.

В табл. 9П представлены экспериментальные распределения температур T_V и T_{VI} при охлаждении призмы из фторопласта в сечении V–VI. Из представленных графиков (рис. 3.4.2) и расчетов табл. 9П видно, что при симметричном охлаждении призмы квадратного сечения из фторопласта ($2R = 28$ мм) с определенного времени $\tau = 800$ с начинается упорядоченный тепловой режим, а температурный комплекс Φ_{V-VI} выходит на прямую линию. Используя графические построения Φ и в результате усреднения полученного углового коэффициента $\Delta\Phi / \Delta\tau$ подсчитывается значение коэффициента температуропроводности фторопласта по формуле (3.2.7).

Для сечения V–VI ($R_* = 0,0135$ м) в диапазоне $\tau = 1000 \dots 1800$ с

$$a = \frac{R_*^2}{4,94} \frac{\Delta\Phi}{\Delta\tau} = \frac{(0,0135)^2 \cdot [-0,464 - (-3,04)]}{4,94 \cdot 800} = 0,119 \cdot 10^{-6}, \text{ м}^2/\text{с}.$$

Абсолютной оценкой начала регулярной части процесса охлаждения, по сечению V–VI призмы должно служить соотношение Ψ_{**} , определяемое по (3.2.12). Для призмы квадратного сечения из фторопласта ($2R = 28$ мм) при ее начальной температуре $T_0 = 96$ °С наступление упорядоченного теплового режима определяется по соотношению Ψ_{**} .

Для сечения V–VI (табл. 9П и рис. 3.4.2):

- при $\tau = 800$ с

$$\Psi_{**} = (T_0 - T_V) / (T_0 - T_{VI}) = (96 - 67) / (96 - 57) = 0,74;$$

- при $\tau = 1000$ с

$$\Psi_{**} = (T_0 - T_V) / (T_0 - T_{VI}) = (96 - 62,5) / (96 - 54) = 0,8.$$

Следовательно, для сечения V–VI, начиная со времени $\tau = 920$ с, наступил (с погрешностью порядка 1 %) упорядоченный тепловой режим, так как при $\tau = 1000$ с, $\Psi_{**} = 0,8 > 0,78$.

В результате серии экспериментов при нагревании и охлаждении призмы квадратного сечения из фторопласта ($2R = 28$ мм) получены следующие значения коэффициента температуропроводности:

- нагревании фторопласта $a_{V-VI} = 0,12 \cdot 10^{-6}, \text{ м}^2/\text{с};$
- при охлаждении фторопласта $a_{V-VI} = 0,119 \cdot 10^{-6}, \text{ м}^2/\text{с}.$

По результатам метрологической аттестации Всесоюзного научно-исследовательского института метрологии им. Д.И. Менделеева (г. Санкт-Петербург) коэффициент температуропроводности фторопласта составил $a = 0,118 \cdot 10^{-6}, \text{ м}^2/\text{с}.$

3.5. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕМПЕРАТУРОПРОВОДНОСТИ БЕТОНА

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

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 Φ_{I-II}, Φ_{V-VI} для сечения I–II и V–VI призмы.

°C

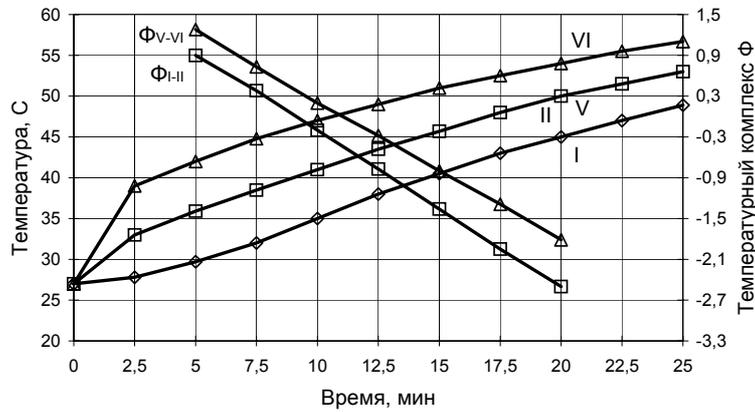


Рис. 3.5.1. Нагрев призмы квадратного сечения из жаростойкого бетона ($2R = 50$ мм):

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

В табл. 10П представлены экспериментальные распределения температур при нагревании призмы из бетона в сечении V–VI. В таблицу программы Excel вводятся только значения температур T_V и T_{VI} , полученные на основе эксперимента в определенные промежутки времени τ .

Из представленных математических вычислений и таблиц программы Excel 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 Φ 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 из табл. 10П программы Excel 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 Ψ_{**} , определяемое по (3.2.12). Для призмы квадратного сечения из бетона ($2R =$

$= 50$ мм) при ее начальной температуре $T_0 = 26$ °C наступление упорядоченного теплового режима определяется по соотношению Ψ_{**} .

Для сечения V–VI (табл. 10П и 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), когда 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 Φ_{I-II} и Φ_{V-VI} , вычисленного по формулам (3.2.4) и (3.2.6). Визуально выявляется участок прямой линии температурного комплекса Φ_{I-II} и Φ_{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 $(4,94 a) / R^2$.

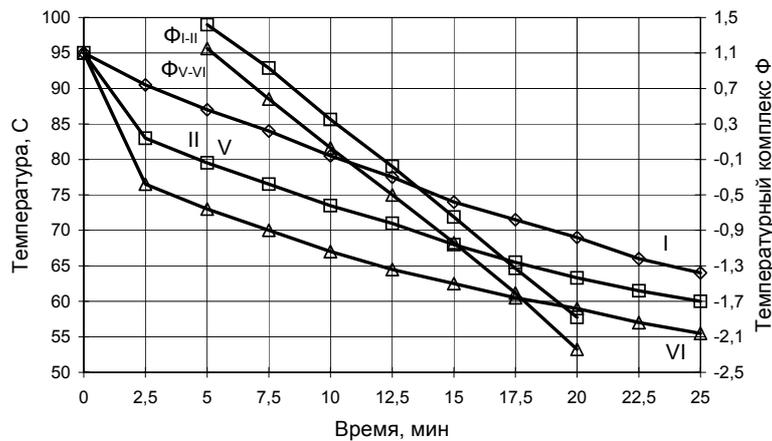


Рис. 3.5.2. Охлаждение призмы квадратного сечения из жаростойкого бетона ($2R = 50$ мм) на воздухе:

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

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

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

- 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 ре-

жим, угловой коэффициент $\Delta\Phi / \Delta\tau$ каждой построенной прямой линии становится постоянным, а температурные комплексы Φ_{I-II} и Φ_{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.

3.6. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕМПЕРАТУРОПРОВОДНОСТИ ФТОРОПЛАСТА И ОРГСТЕКЛА ПРИ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ И В УСЛОВИЯХ ВАКУУМА

Апробация абсолютного метода для определения коэффициента температуропроводности материалов в условиях низких температур проводилась на призме квадратного сечения из фторопласта. Вначале призму квадратного сечения из фторопласта ($2R = 28$ мм) помещали в сосуд с жидким азотом, где производилось охлаждение до температуры ($-195,8$ °С), а затем охлажденный образец помещали на воздухе при комнатной температуре и естественной конвекции.

На рис. 3.6.1 приведены результаты экспериментального распределения температур в точках V и VI при нагревании призмы квадратного сечения из фторопласта ($2R = 28$ мм), а также построен график температурного комплекса Φ_{V-VI} , вычисленного по формуле (3.2.3).

В табл. 11П представлены экспериментальные распределения температур по поверхности призмы квадратного сечения (точки V и VI) из фторопласта ($2R = 28$ мм) при ее нагревании на воздухе с комнатной температурой, а также результаты расчетов температурного комплекса Φ_{V-VI} и коэффициента температуропроводности при отрицательных температурах.

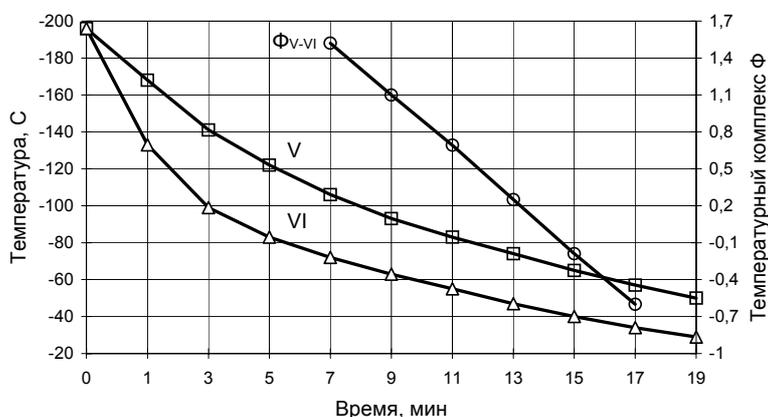


Рис. 3.6.1. Нагрев призмы квадратного сечения из фторопласта

($2R = 28$ мм) на воздухе и естественной конвекции:

V, VI – значения температур по сечению призмы;

Φ_{V-VI} – температурный комплекс, вычисленный по формуле (3.2.3)

Из представленного графика и вычислений видно, что при естественном нагревании на воздухе предварительно охлажденной призмы квадратного сечения ($2R = 28$ мм) из фторопласта при низких (отрицательных) температурах с определенного времени $\tau = 7 \dots 9$ мин начинается упорядоченный тепловой режим, угловой коэффициент $\Delta\Phi / \Delta\tau$ становится постоянным, а температурный комплекс Φ выходит на прямую линию. Численное значение коэффициента температуропроводности a фторопласта определяется по формуле (3.2.7).

Для сечения V–VI ($R_* = 0,014$ м) в диапазоне $\tau = 7 \dots 17$ мин

$$a = \frac{R_*^2}{4,94} \frac{\Delta\Phi}{\Delta\tau} = \frac{(0,014)^2 \cdot [1,57 - (-0,5)]}{4,94 \cdot (17 - 7) \cdot 60} = 0,13 \cdot 10^{-6}, \text{ м}^2/\text{с}.$$

Абсолютной оценкой начала регулярной части процесса нагревания, в сечении V–VI призмы должно служить соотношение Ψ_{**} , определяемое по (3.2.12). Для призмы квадратного сечения из фторопласта ($2R = 28$ мм) при ее начальной температуре $T_0 = (-195,8 \text{ }^\circ\text{C})$ наступление упорядоченного теплового режима определяется по соотношению Ψ_{**} .

Для сечения V–VI (табл. 11П и рис. 3.6.1):

- при $\tau = 9$ мин

$$\Psi_{**} = (T_V - T_0) / (T_{VI} - T_0) = (-93) - (-196) / (-63) - (-196) = 0,774;$$

- при $\tau = 11$ мин

$$\Psi_{**} = (T_V - T_0) / (T_{VI} - T_0) = (-83) - (-196) / (-55) - (-196) = 0,8.$$

Следовательно, для сечения V–VI, начиная со времени $\tau = 10$ мин, наступил (с погрешностью порядка 1 %) упорядоченный тепловой режим, так как при $\tau = 11$ мин, $\Psi_{**} = 0,8 > 0,78$. В процессе математических расчетов из табл. 11П программы Excel видно, что для сечения V–VI в диапазоне $\tau = 9 \dots 17$ мин коэффициент температуропроводности фторопласта a повторяет свои истинные значения, что соответствует упорядоченному тепловому режиму в призме квадратного сечения.

В результате серии экспериментов при нагревании с предварительно охлажденной призмой квадратного сечения из фторопласта ($2R = 28$ мм) в условиях низких (отрицательных) температур получили следующее среднее значение коэффициента температуропроводности $a_{V-VI} = 0,125 \cdot 10^{-6}, \text{ м}^2/\text{с}$.

Результаты опытов показывают вполне удовлетворительное согласование коэффициента температуропроводности фторопласта при низких (отрицательных) температурах и подтверждают высокую точность метода для определения коэффициента температуропроводности a по температурным измерениям на поверхности образца.

Апробирование 400 мм с толщиной стенки 10 мм. Термопары и электрический провод выводились из камеры через уплотнительную вакуумную резину, проложенную между крышкой и корпусом камеры. Используя вакуумный насос 8Н-1МГ, в камере создавалось разрежение 0,4 Па, после чего включался нагреватель и экспериментальная установка вместе с образцом прогревалась в вакуумной камере при работающем вакуумном насосе.

Эксперименты проводились в абсолютного метода для определения коэффициента температуропроводности в условиях вакуума при наличии только лучистого теплообмена проводилось на призме квадратного сечения из оргстекла.

Вначале призму квадратного сечения из оргстекла ($2R = 90$ мм) помещали в нагревательную экспериментальную установку с начальной комнатной температурой, а затем экспериментальную установку вместе с исследуемым образцом помещали в вакуумную камеру.

Цилиндрическая вакуумная камера выполнена в виде герметичного стального сосуда диаметром диапазоне температур 290...380 К.

На рис. 3.6.2 приведены результаты экспериментального распределения температур в точках V и VI при нагревании в вакууме призмы квадратного сечения из оргстекла ($2R = 90$ мм), а также построен график температурного комплекса Φ_{V-VI} , вычисленного по формуле (3.2.3).

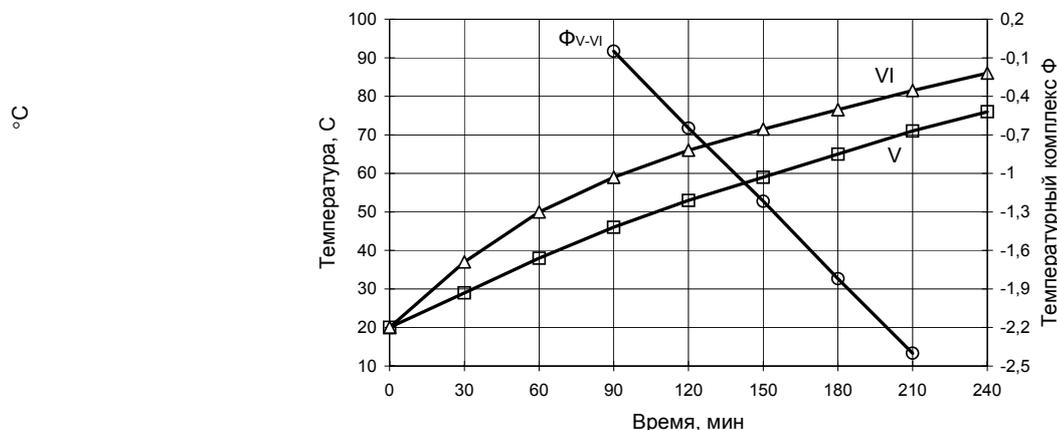


Рис. 3.6.2. Нагрев в вакууме призмы квадратного сечения из оргстекла ($2R = 90$ мм) суммарным потоком тепла:

V, VI – значения температур по сечению призмы;

Φ_{V-VI} – температурный комплекс, вычисленный по формуле (3.2.3)

В табл. 12П представлены экспериментальные распределения температур в сечении V–VI при нагревании призмы из оргстекла в вакууме. В таблицу программы Excel вводятся только значения температур T_V и T_{VI} , полученные на основе эксперимента в определенные промежутки времени τ . По измеренным во времени температурам T_V , T_{VI} в соответствующих точках призмы для сечения V–VI по формуле (3.2.3) вычисляется температурный комплекс Φ_{V-VI} .

Из представленных графиков и вычисленных таблиц программы Excel видно, что при симметричном нагревании призмы квадратного сечения из оргстекла ($2R = 90$ мм) в вакууме с определенного времени

$\tau = 90$ мин начинается упорядоченный тепловой режим, угловой коэффициент $\Delta\Phi / \Delta\tau$ становится постоянным, а температурный комплекс Φ выходит на прямую линию. Численное значение коэффициента температуропроводности a оргстекла вычисляется по формуле (3.2.7).

В процессе математических расчетов из табл. 12П программы Excel видно, что в диапазоне $\tau = 90 \dots 210$ мин коэффициент температуропроводности a оргстекла повторяет свои истинные значения, что соответствует упорядоченному тепловому режиму в призме квадратного сечения.

Для сечения V–VI ($R_* = 0,044$ м) в диапазоне $\tau = 90 \dots 210$ мин

$$a = \frac{R_*^2}{4,94} \frac{\Delta\Phi}{\Delta\tau} = \frac{(0,044)^2 \cdot [(0 - (-2,4))]}{4,94 \cdot (210 - 90) \cdot 60} = 0,129 \cdot 10^{-6}, \text{ м}^2/\text{с}.$$

В результате экспериментов при нагревании призмы квадратного сечения из оргстекла ($2R = 90$ мм) в условиях вакуума имели среднее значение коэффициента температуропроводности $a_{V-VI} = 0,128 \cdot 10^{-6}, \text{ м}^2/\text{с}$.

Результаты опытов показывают удовлетворительное согласование коэффициента температуропроводности оргстекла в условиях вакуума и подтверждают высокую точность метода для определения коэффициента температуропроводности a по температурным измерениям на поверхности образца.

3.7. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕМПЕРАТУРОВОДНОСТИ МАТЕРИАЛОВ КОНТАКТНЫМ МЕТОДОМ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ

Во всех проведенных экспериментах было отмечено, что наибольший интерес представляют точки V – середины грани призмы квадратного сечения и VI – ребра призмы. В этом случае все измерения температур квадратного сечения и термодарой вглубь значения и возможность

Отличительной неразрушающего кон- непосредственный поверхности

опытов методом измерения температуры квадратного сечения контактных термодар,

Для измерения призме квадратного штоками б, на конце которых закреплены фторопластовые теплоизоляторы 4. Между поверхностью образца (призмы) и каждым фторопластовым теплоизолятором по изотермической поверхности призмы (вдоль образца) прокладывалась термодара. Пружины 5 создают дополнительное усилие сжатия для обеспечения более надежного контакта спаев термодар с образцом.

Подготовленные к опыту образцы (призмы квадратного сечения) с контактными термодарами помещали в испытательную цилиндрическую камеру и симметрично нагревали в установке за счет конвекции и радиации одновременно. На рис. 3.7.2 приведены результаты экспериментального распределения температур ребра T_p и середины грани $T_{гр}$ при нагревании призмы квадратного сечения ($2R = 0,05$ м) из красного кирпича воздушно – сухой влажности плотностью $\rho = 1700$ кг/м³.

Температурный комплекс Φ вычисляется по измеренным во времени температурам T_p – ребра и $T_{гр}$ – середины грани по формуле

$$\Phi = \ln(T_p - T_{гр}) - 1,23 \int \frac{dT_p}{T_p - T_{гр}} = \ln(T_{VI} - T_V) - 1,23 \int \frac{dT_{VI}}{T_{VI} - T_V}. \quad (3.7.1)$$

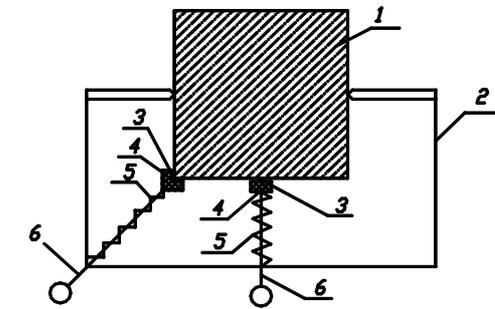


Рис. 3.7.1. Схема установки контактных термодар на призме квадратного сечения:

- 1 – призма квадратного сечения; 2 – рамка;
- 3 – места установки термодар;

производятся на поверхности призмы отпадает необходимость проникать с образца, что имеет особое практическое использования контактных термодар.

особенностью контактных методов троля ТФХ материалов и изделий является контакт термодар с участком исследуемого объекта. Для проведения неразрушающего контроля и для ребра и середины грани на призме разработано устройство с использованием схема которого приведена на рис. 3.7.1.

температуры ребра и середины грани на сечения установлена рамка 2 с двумя

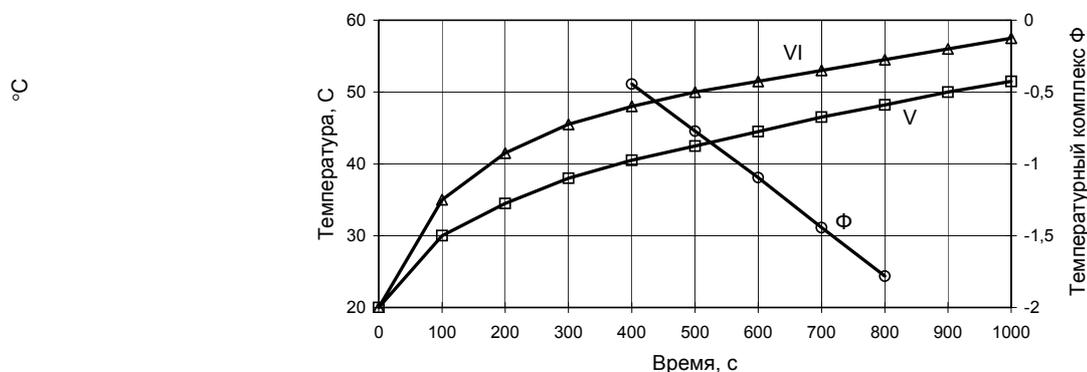


Рис. 3.7.2. Нагрев призмы квадратного сечения из красного кирпича воздушно-сухой влажности, $\rho = 1700$ кг/м³, $2R = 0,05$ м, ($R_* = 0,024$ м):

V – температура середины грани; VI – температура ребра;
 Ф – температурный комплекс, вычисленный по формуле (3.7.1)

В табл. 13П представлены экспериментальные распределения температур ребра и середины грани при нагревании призмы из красного кирпича, приведены расчеты температурного комплекса Ф, коэффициента температуропроводности красного кирпича и критерия Ψ_{**} , выполненные в программе Excel. В таблицу программы Excel вводятся только значения температур T_p и $T_{гр}$, полученные на основе эксперимента в определенные промежутки времени τ .

Из представленного графика (рис. 3.7.2), математических вычислений и таблиц программы Excel видно, что при симметричном нагревании призмы квадратного сечения из красного кирпича ($2R = 50$ мм) с определенного времени $\tau = 400$ с начинается упорядоченный тепловой режим, угловой коэффициент $\Delta\Phi / \Delta\tau$ становится постоянным, а температурный комплекс Ф выходит на прямую линию. Численное значение коэффициента температуропроводности a красного кирпича вычисляется по формуле (3.2.7).

В процессе математических расчетов в таблице программы Excel (табл. 13П), коэффициент температуропроводности a красного кирпича повторяет свои истинные значения в течение $\tau = 400 \dots 1000$ с, что соответствует упорядоченному тепловому режиму в призме квадратного сечения.

Абсолютной оценкой начала регулярной части процесса при симметричном нагревании призмы квадратного сечения из красного кирпича должно служить соотношение Ψ_{**} , определяемое по таблице программы Excel (табл. 13П).

Для призмы квадратного сечения из красного кирпича при ее начальной температуре $T_0 = 20$ °С наступление упорядоченного теплового режима начинается при $\tau = 600$ с, когда критерий Ψ_{**} согласно расчета программы Excel становится равным 0,78 и, следовательно, наступил (с погрешностью порядка 1 %) упорядоченный тепловой режим.

В результате серии экспериментов при нагревании призмы квадратного сечения из красного кирпича ($2R = 50$ мм) получили значение коэффициента температуропроводности $a = 0,393 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$.

По данным НИИ Строительной физики [221] у красного кирпича плотностью $\rho = 1700 \text{ кг}/\text{м}^3$ и влажностью 2 % коэффициент температуропроводности составляет $a = 0,39 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$.

На рис. 3.7.3 приведены результаты экспериментального распределения температур ребра T_p и середины грани $T_{гр}$ при нагревании призмы квадратного сечения ($2R = 0,05$ м) из силикатного кирпича воздушно – сухой влажности плотностью $\rho = 2000 \text{ кг}/\text{м}^3$, построенных с помощью программы Excel. Расчеты температурного комплекса Ф по формуле (3.7.1), коэффициента температуропроводности a силикатного кирпича по формуле (3.2.7) выполнены в расчетной программе Excel и приведены в табл. 14П.

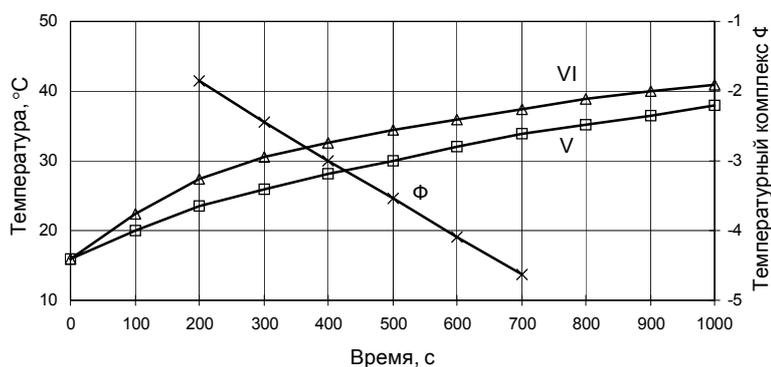


Рис. 3.7.3. Нагрев призмы квадратного сечения из силикатного кирпича воздушно-сухой влажности, $\rho = 2000 \text{ кг}/\text{м}^3$; $2R = 0,05$ м:
 V – температура середины грани; VI – температура ребра;
 Ф – температурный комплекс, вычисленный по формуле (3.7.1)

Из представленного графика (рис. 3.7.3) и вычислений табл. 14П программы Excel видно, что при симметричном нагревании призмы квадратного сечения из силикатного кирпича ($2R = 50$ мм), начиная с $\tau = 200$ с наступает упорядоченный тепловой режим, угловой коэффициент $\Delta\Phi / \Delta\tau$ становится постоянным, а температурный комплекс Φ выходит на прямую линию.

Численное значение коэффициента температуропроводности a силикатного кирпича ($R_* = 0,023$ м) в диапазоне $\tau = 300 \dots 700$ с составляет

$$a = \frac{R_*^2}{4,94} \frac{\Delta\Phi}{\Delta\tau} = \frac{(0,023)^2}{4,94} \frac{(-2,45) - (-4,62)}{700 - 300} = 0,58 \cdot 10^{-6}, \text{ м}^2/\text{с}.$$

По данным НИИ Строительной физики [221] у силикатного кирпича с плотностью $\rho = 2000$ кг/м³ и влажностью 5 % коэффициент температуропроводности составляет $a = 0,576 \cdot 10^{-6}$ м²/с. Результаты всех опытов показывают вполне удовлетворительное согласование значений коэффициента температуропроводности при нагревании призмы квадратного сечения из красного и силикатного кирпича ($2R = 50$ мм) в предварительно прогретой установке.

Были также произведены исследования по сравнению вариантов одновременного измерения температур на поверхности призмы квадратного сечения с использованием контактных термопар (рис. 3.6.1) и расположением термопар в пазу на поверхности призмы [53, 128–133, 208, 252, 253].

На рис. 3.7.4 приведены результаты экспериментального распределения температур ребра T_p и середины грани $T_{гр}$ при нагревании призмы квадратного сечения ($2R = 0,04$ м) из белого оргстекла плотностью $\rho = 1200$ кг/м³, построенных с помощью программы Excel.

В табл. 15П и 16П представлены экспериментальные распределения температур ребра и середины грани при нагревании призмы квадратного сечения ($2R = 0,04$ м) из белого оргстекла плотностью $\rho = 1200$ кг/м³, приведены расчеты температурного комплекса Φ , коэффициента температуропроводности оргстекла и критерия Ψ_{**} , выполненные в программе Excel. В таблицу программы Excel вводятся только значения температур T_p и $T_{гр}$, полученные на основе эксперимента в определенные промежутки времени τ . Соответственно для каждого промежутка времени $\Delta\tau$ вычисляются Φ , Ψ_{**} , a .

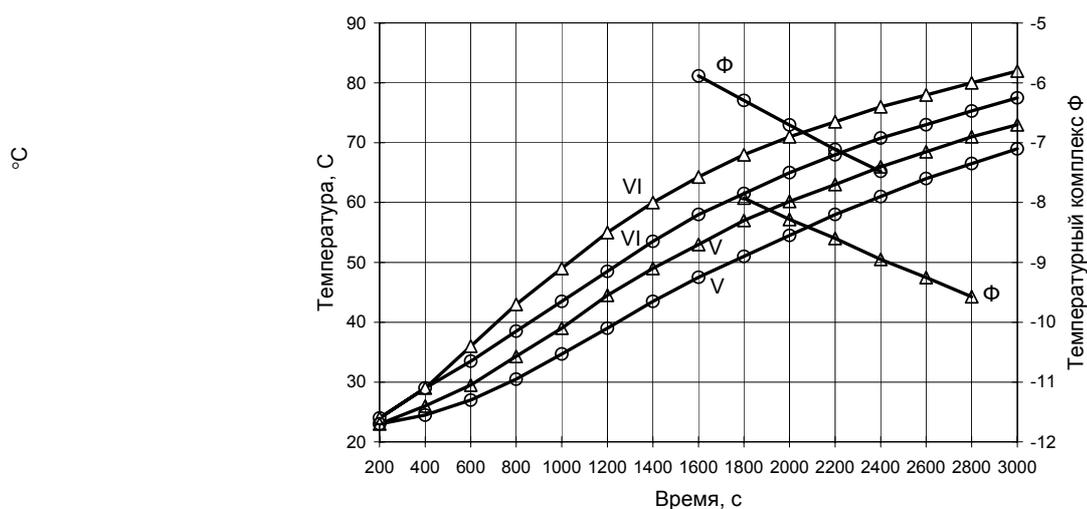


Рис. 3.7.4. Нагрев призмы квадратного сечения из белого оргстекла $\rho = 1200$ кг/м³; $2R = 0,04$ м:

Δ – контактные термопары; \circ – термопары в пазу;
 V – температура середины грани; VI – температура ребра;
 Φ – температурный комплекс, вычисленный по формуле (3.7.1)

Из представленных графиков (рис. 3.7.4) и математических вычислений программы Excel (табл. 15П) видно, что при симметричном нагревании призмы квадратного сечения из белого оргстекла ($2R = 40$ мм) и при установке термопар в пазу (\circ), начиная с $\tau = 1600$ с наступает упорядоченный тепловой режим, угловой коэффициент $\Delta\Phi / \Delta\tau$ становится постоянным, а температурный комплекс Φ выходит на прямую линию.

В процессе математических расчетов программы Excel (табл. 15П), коэффициент температуропроводности a повторяет свои значения в течение $\tau = 1600 \dots 2400$ с, что соответствует упорядоченному тепловому режиму в призме квадратного сечения.

Численное значение коэффициента температуропроводности a белого оргстекла ($R_* = 0,018$ м) при установке термопар в пазу (\circ) определяется по формуле (3.2.7) и в диапазоне времени $\tau = 1600 \dots 2400$ с составляет

$$a = \frac{R_*^2}{4,94} \frac{\Delta\Phi}{\Delta\tau} = \frac{(0,018)^2}{4,94} \frac{(-5,88) - (-7,48)}{2400 - 1600} = 0,13 \cdot 10^{-6}, \text{ м}^2/\text{с}.$$

Абсолютной оценкой начала регулярной части процесса при симметричном нагревании призмы квадратного сечения из оргстекла ($2R = 40$ мм) должно служить соотношение Ψ_{**} , определяемое по таблице программы Excel (табл. 15П). Для призмы из белого оргстекла ($2R = 40$ мм) при ее начальной температуре $T_0 = 22$ °С при $\tau = 2100$ с критерий Ψ_{**} согласно расчета программы Excel становится равным 0,78 и, следовательно, наступил (с погрешностью порядка 1 %) упорядоченный тепловой режим.

Из представленных графиков (рис. 3.7.4) и вычислений программы Excel (табл. 16П) также видно, что при симметричном нагревании призмы квадратного сечения из белого оргстекла ($2R = 40$ мм) и при установке контактных термопар (Δ), начиная с $\tau = 1800$ с устанавливается упорядоченный тепловой режим, угловой коэффициент $\Delta\Phi / \Delta\tau$ становится постоянным, а температурный комплекс Φ выходит на прямую линию.

В процессе математических расчетов программы Excel (табл. 16П), коэффициент температуропроводности a повторяет свои значения в течение $\tau = 1800 \dots 2800$ с, что соответствует упорядоченному тепловому режиму в призме квадратного сечения.

Численное значение коэффициента температуропроводности a белого оргстекла ($R_* = 0,018$ м) при установке контактных термопар (Δ) определяется по формуле (3.2.7) и в диапазоне времени $\tau = 1800 \dots 2800$ с составляет

$$a = \frac{R_*^2}{4,94} \frac{\Delta\Phi}{\Delta\tau} = \frac{(0,0195)^2}{4,94} \frac{(-7,925) - (-9,572)}{2800 - 1800} = 0,126 \cdot 10^{-6}, \text{ м}^2/\text{с}.$$

Абсолютной оценкой начала регулярной части процесса при симметричном нагревании призмы квадратного сечения из оргстекла ($2R = 40$ мм) служит соотношение Ψ_{**} , определяемое по таблице программы Excel (табл. 16П). Для призмы квадратного сечения из белого оргстекла при ее начальной температуре $T_0 = 22$ °С при $\tau = 2000$ с критерий Ψ_{**} согласно расчета программы Excel становится равным 0,78 и, следовательно, наступил (с погрешностью порядка 1 %) упорядоченный тепловой режим.

По данным [221] у белого оргстекла плотностью $\rho = 1220$ кг/м³ коэффициент температуропроводности составляет $a = 0,13 \cdot 10^{-6}$ м²/с.

Следовательно, для проведения опытов методом неразрушающего контроля и для измерения температуры ребра и середины грани на призме квадратного сечения возможно использование разработанного устройства с использованием контактных термопар. Проведенные эксперименты подтверждают достаточную точность полученных значений коэффициентов температуропроводности различных материалов.

Обработка результатов всех экспериментов производилась в соответствии с существующими рекомендациями [50, 53, 75, 111, 138, 142, 150, 253].

Разработанный абсолютный метод определения коэффициента температуропроводности материалов выгодно отличаются от известных методов быстродействием, небольшой погрешностью, обладают новизной и оригинальностью. Достаточно лишь произвести измерения температур на поверхности призмы квадратного сечения – на ребре и середине грани. Для этого используется неразрушающий метод теплового контроля путем использования контактных термопар.

Кроме того, 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.

3.8. ВЫВОДЫ

1. Разработаны методика и экспериментальная установка для определения коэффициента температуропроводности на образцах, выполненных в виде призмы квадратного сечения. Для экспериментального определения коэффициента температуропроводности материалов возможен один из нескольких любых вариантов: нагревание образца в предварительно прогретой экспериментальной установке или одновременно вместе с ней, охлаждение образца на воздухе, нагрев охлажденного образца на воздухе.

Абсолютный метод определения коэффициента температуропроводности основан на измерении только двух температур на поверхности призмы квадратного сечения – на ребре и середине грани. При этом для определения коэффициента температуропроводности вещества и любого материала возможно два варианта расчета: путем графического построения температур ребра и середины грани призмы квадратного сечения, расчета температурного комплекса Φ и определения углового коэффициента его прямого участка; либо путем использования программы Excel и абсолютной оценки начала регулярной части упорядоченного теплового режима.

При нагревании образца строго заданной или определенной температуры в установке не предусматривается. Проведение эксперимента не требует измерений таких физических параметров, как температура окружающей среды, коэффициент теплообмена, степень черноты. Нет необходимости в предварительном определении коэффициента теплопроводности или теплоемкости вещества. Отпадает необходимость в создании чисто конвективной или чисто лучистой окружающей среды, что сильно упрощает экспериментальную установку.

2. Для проведения опытов и для измерения температуры ребра и середины грани на призме квадратного сечения возможно использование разработанного устройства с использованием контактных термопар. Достаточно лишь произвести измерения температур на поверхности призмы квадратного сечения – на ребре и середине грани путем использования контактных термопар. Проведенные эксперименты методом неразрушающего теплового контроля подтверждают достаточную точность полученных коэффициентов температуропроводности различных материалов.

3. Полученные в результате экспериментов коэффициенты температуропроводности оргстекла, фторопласта, бетона, строительных и теплоизоляционных материалов согласуются с опубликованными в справочной и технической литературе данными и подтверждают высокую точность метода для определения коэффициента температуропроводности по температурным измерениям на поверхности образца.

4. Предлагаемая методика выгодно отличается от известных методов быстродействием, небольшой погрешностью, обладает новизной и оригинальностью. Кроме того, 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.

4. НАУЧНО-МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ КОМПЛЕКСНОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК МАТЕРИАЛОВ МЕТОДОМ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ

4.1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОБЪЕМНОЙ ТЕПЛОЕМКОСТИ И ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ МАТЕРИАЛОВ

Многие явления природы подчиняются закону простого гармонического колебания. Только периоды таких колебаний для разных условий могут быть различными [28]. Так, период наиболее резких колебаний температуры Земли равен одному году, а для ограждающих конструкций жилого помещения он составляет одни сутки. Температурные колебания распространяются по закону косинуса и легко создаются в лабораторных условиях, что позволяет определить объемную теплоемкость (c_p) и теплопроводность материалов, изделий и ограждающих конструкций.

Если процесс теплового колебания изделия или конструкции продолжается достаточно долго, то начальные условия не будут сказываться на распространении температуры, а явление распространения температурных волн описывается двумя уравнениями:

$$\frac{\partial \vartheta}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial x^2}; \quad (4.1.1)$$

$$\vartheta_{0,\tau} = \vartheta_{\Pi}^{\max} \cos(\omega \tau), \quad (4.1.2)$$

где a – коэффициент температуропроводности материала, $\text{м}^2/\text{с}$; ϑ_{Π}^{\max} – амплитуда колебаний избыточной температуры на поверхности изделия (максимальное отклонение температуры на поверхности изделия от средней температуры материала, массива), $^{\circ}\text{C}$; $\omega = 2\pi/z$ – частота температурных колебаний на поверхности материала, изделия, с^{-1} ; z – полный период колебаний, с .

Решение системы уравнений (4.1.1) – (4.1.2) имеет вид

$$\vartheta_{x,\tau} = \vartheta_{\Pi}^{\max} \cos(\omega \tau - kx) e^{-kx}, \quad (4.1.3)$$

где $k = \sqrt{\omega/2a}$; a – коэффициент температуропроводности материала, $\text{м}^2/\text{с}$.

Из решения (4.1.3) вытекает ряд зависимостей, которые часто используются в технических расчетах [28]. Так, плотность теплового потока на поверхности может быть найдена с помощью выражения (4.1.3) по формуле

$$q_{\Pi,\tau} = -\lambda \left(\frac{\partial \vartheta}{\partial x} \right)_{\Pi} = \lambda k \sqrt{2} \vartheta_{\Pi}^{\max} \cos\left(\omega \tau + \frac{\pi}{4}\right).$$

Последнее выражение можно записать и в виде

$$q_{\Pi,\tau} = B \vartheta_{\Pi}^{\max} \cos\left(\omega \tau + \frac{\pi}{4}\right),$$

где B – параметр, зависящий от теплофизических свойств материала.

Максимальная плотность теплового потока на поверхности

$$q_{\text{п}}^{\text{max}} = B \vartheta_{\text{п}}^{\text{max}}. \quad (4.1.4)$$

Параметр B характеризует аккумулирующую способность изделия или массива и носит название коэффициента *теплоусвоения*, который в процессе распространения температурных волн остается постоянным. В количественном значении коэффициент теплоусвоения материала (массива) при тепловых колебаниях – это отношение максимального теплового потока на поверхности материала $q_{\text{п}}^{\text{max}}$ к максимальному отклонению температуры $\vartheta_{\text{п}}^{\text{max}}$:

$$B = q_{\text{п}}^{\text{max}} / \vartheta_{\text{п}}^{\text{max}}. \quad (4.1.5)$$

Коэффициент теплоусвоения B численно определяется из соотношения

$$B = \sqrt{\lambda (c\rho) \omega}, \quad (4.1.6)$$

где λ – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К); $(c\rho)$ – объемная теплоемкость материала, Дж/(м³·К); $\omega = 2\pi/z$ – частота температурных колебаний на поверхности материала, изделия, с⁻¹; z – полный период температурных колебаний на поверхности, с.

Из (4.1.4) и (4.1.6) видно, что максимальная плотность теплового потока на поверхности материала (массива) и его теплотехнические характеристики будут связаны следующей зависимостью:

$$q_{\text{п}}^{\text{max}} = \vartheta_{\text{п}}^{\text{max}} \sqrt{\lambda (c\rho) \omega}, \quad (4.1.7)$$

где $\vartheta_{\text{п}}^{\text{max}}$ – **амплитуда колебаний избыточной температуры на поверхности (максимальное отклонение температуры на поверхности от средней температуры материала, массива), °С.**

Известно [133, 134], что $\lambda = a(c\rho)$, тогда в соответствии с формулой (4.1.6) коэффициент теплоусвоения

$$B = \sqrt{\lambda (c\rho) \omega} = (c\rho) \sqrt{a \omega}, \quad (4.1.8)$$

где a – коэффициент температуропроводности материала, м²/с.

Согласно выражениям (4.1.7) и (4.1.8) максимальная плотность теплового потока на поверхности материала $q_{\text{п}}^{\text{max}}$ и амплитуда колебаний избыточной температуры на поверхности изделия $\vartheta_{\text{п}}(\tau)$ в любой момент времени нагрева или охлаждения могут быть записаны в виде

$$q_{\text{п}}^{\text{max}} = (c\rho) \vartheta_{\text{п}}(\tau) \sqrt{a \omega}. \quad (4.1.9)$$

Полученное соотношение (4.1.9) позволят определить объемную теплоемкость исследуемого материала (образца) по выражению

$$(c\rho) = \frac{q_{\text{п}}^{\text{max}}}{\vartheta_{\text{п}}(\tau) \sqrt{a \omega}}. \quad (4.1.10)$$

На рис. 4.1.1 показано распределение температуры при воздействии теплового потока на поверхности призмы квадратного сечения – температурная полуволна при нагревании и охлаждении.

Очевидно, что время подъема температурной полуволны Z_* (в процессе нагрева) и время спада температурной полуволны (в процессе охлаждения) будет показывать только половину от времени полного периода колебания температурной волны ($Z = 2Z_* = 2\tau$). Следовательно, максимальная плотность теплового потока $q_{\text{п}}^{\text{max}}$ на поверхности призмы квадратного сечения и

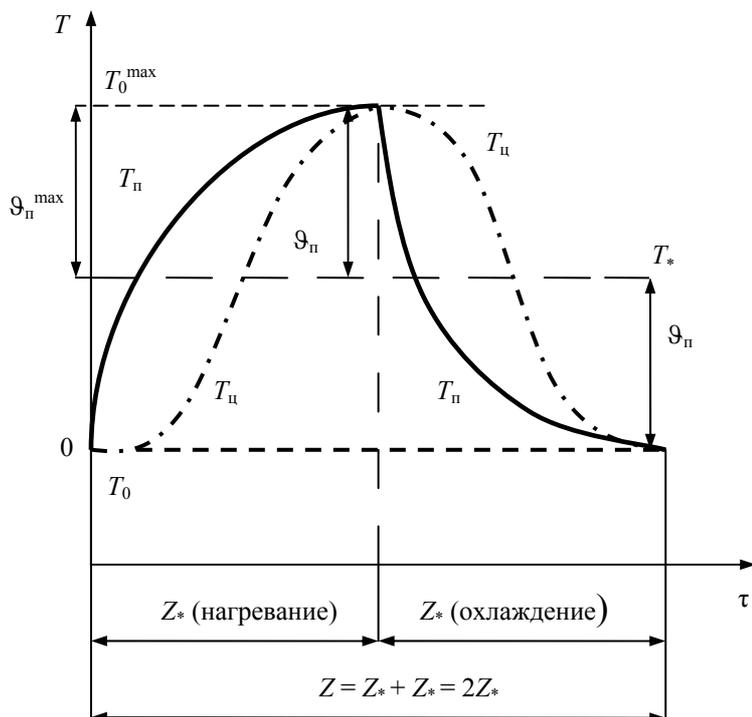
амплитуда колебаний избыточной температуры на поверхности $\vartheta_n(\tau)$ в любой момент времени нагрева или охлаждения согласно (4.1.9) могут быть записаны и в виде соотношения

$$q_n^{\max} = (c\rho)\vartheta_n(\tau)\sqrt{a\frac{\pi}{\tau}}. \quad (4.1.11)$$

Ошибка!

Рис. 4.1.1. Изменение температурной полуволны при нагревании и охлаждении при воздействии теплового потока на поверхности призмы квадратного сечения:

T_n – температура середины грани на поверхности призмы; T_c – температура центра; T_0 – начальная температура призмы; T_* – средняя температура материала; T_0^{\max} – максимальная температура призмы, полученная при ее нагревании до термодинамического равновесия; ϑ_n^{\max} – амплитуда колебаний на поверхности призмы или максимальное отклонение температуры на поверхности от средней температуры материала; ϑ_n – избыточная текущая температура на поверхности призмы; Z_* – полуволна при нагревании и охлаждении призмы; Z – полный период температурной волны на поверхности призмы



тура на поверхности призмы; Z_* – полуволна при нагревании и охлаждении призмы; Z – полный период температурной волны на поверхности призмы

В выражении (4.1.11) температуропроводность вещества характеризует меру тепловой инерции материала. При распространении тепла в полуограниченном пространстве коэффициент температуропроводности служит важнейшей теплофизической характеристикой, определяющей тепловую активность массива ограждающих конструкций и сооружений. При увеличении значений объемной теплоемкости ($c\rho$) коэффициент температуропроводности a уменьшается и это означает большое накопление тепла в материале за период нагрева и неглубокое проникновение температурных волн, а при малых значениях ($c\rho$) – наоборот.

С экологической точки зрения ограждающих конструкций более благоприятными являются строительные и теплоизоляционные материалы, обладающие более высокими значениями коэффициента теплоусвоения. В этом случае колебания мощности нагревательных приборов будут в какой-то степени компенсироваться накоплением и расходом тепловой энергии, а температура окружающего воздуха будет более равномерной во времени.

Если коэффициент температуропроводности a материала предварительно рассчитать, используя закономерность упорядоченного теплового режима (разд. 2 и 3), максимальный тепловой поток на поверхности материала q_n^{\max} определить с помощью тепломера, графиков или формул, а амплитуду колебаний избыточной температуры на поверхности $\vartheta_n(\tau)$ в любой момент времени нагрева или охлаждения измерить термопарой, то согласно (4.1.11), объемную теплоемкость материала можно рассчитать по соотношению

$$(c_p) = \frac{q_{\text{п}}^{\text{max}}}{\vartheta_{\text{п}}(\tau) \sqrt{\frac{a \pi}{\tau}}}. \quad (4.1.12)$$

Если коэффициент температуропроводности a материала предварительно рассчитать, используя закономерность упорядоченного теплового режима (разд. 3), объемную теплоемкость (c_p) определить по формуле (4.1.12), то коэффициент теплопроводности определится из выражения

$$\lambda = a(c_p). \quad (4.1.13)$$

4.2. МАТЕМАТИЧЕСКИЙ И ГРАФИЧЕСКИЙ МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПЛОТНОСТИ ТЕПЛООВОГО ПОТОКА НА ПОВЕРХНОСТИ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ И ИЗДЕЛИЙ

Для расчета плотности теплового потока в зависимости от температуры наружной поверхности строительных материалов, изделий или ограждающих конструкций зданий, сооружений, оконных блоков были произведены теплотехнические расчеты в определенных интервалах температур. Математическая обработка коэффициентов теплоотдачи конвекцией и лучеиспусканием проводилась для трех возможных вариантов:

- от нагретой цилиндрической поверхности экспериментальной установки (рис. 3.1.1) и воздуха внутри установки к наружной поверхности призмы квадратного сечения с размерами стороны грани $2R = 50$ мм;
- от воздуха и стен помещения к наружной поверхности образца, материала, изделия, стены или оконного стекла;
- от внешней поверхности нагретого образца, изделия, стены, стекла, к наружному окружающему воздуху.

Расчеты проводились на основе закона теплопроводности Фурье, конвективного и лучистого теплообмена, исходя из стандартных решений [18, 28, 87, 107, 134, 140, 150, 195, 196]. Математическая обработка коэффициентов теплоотдачи конвекцией и лучеиспусканием позволила получить расчетные зависимости суммарного коэффициента теплоотдачи и плотности теплового потока. Все расчетные формулы представлены в зависимости от температурного напора ΔT и действительны только в определенном диапазоне температур, близких к реальным условиям.

1. Коэффициент теплоотдачи от нагретой цилиндрической поверхности экспериментальной установки (рис. 3.1.1) и воздуха к поверхности призмы квадратного сечения с размерами стороны грани $2R = 50$ мм имеет зависимость

$$\alpha_{\text{общ}} = 4,6 + 0,035 \Delta T + \Delta T^{0,333}, \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}),$$

где $\Delta T = T_{\text{нагр}} - T_{\text{гр}}$; $T_{\text{нагр}}$ – начальная температура нагретой цилиндрической поверхности экспериментальной установки и воздуха внутри установки, менялась от +40 до +100 °С; $T_{\text{гр}}$ – начальная температура середины грани поверхности призмы квадратного сечения менялась от +10 до +30 °С.

Удельный тепловой поток q , от нагретой внутренней цилиндрической поверхности экспериментальной установки (рис. 3.1.1) и воздуха (предварительно нагретого от поверхности установки) к поверхности призмы квадратного сечения с размерами стороны грани $2R = 50$ мм может быть представлен трехчленом вида

$$q = 4,6 \Delta T + 0,035 \Delta T^2 + \Delta T^{1,333}, \text{ Вт/м}^2. \quad (4.2.1)$$

На рис. 4.2.1 представлен график для определения плотности теплового потока q , от нагретой внутренней цилиндрической поверхности экспериментальной установки и воздуха к поверхности

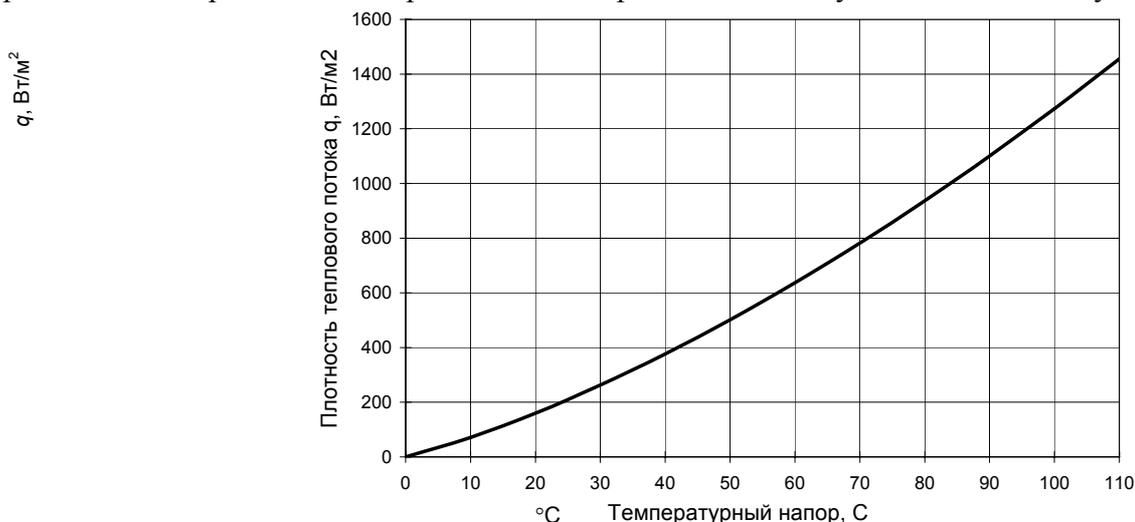


Рис. 4.2.1. Зависимость удельного теплового потока q , Вт/м², от температурного напора ΔT , °C для экспериментальной установки:

$$q = 4,6 \Delta T + 0,035 \Delta T^2 + \Delta T^{1,333};$$

ΔT – температурный напор от цилиндрической поверхности экспериментальной установки и воздуха внутри установки к наружной поверхности призмы квадратного сечения с размерами стороны грани $2R = 50$ мм

призмы квадратного сечения с размерами стороны грани $2R = 50$ мм в зависимости от температурного напора ΔT .

2 Коэффициент теплоотдачи от воздуха к наружной поверхности материала, образца, стены или оконного стекла (или наоборот) имеет зависимость

$$\alpha_{\text{общ}} = 4,6 + 0,035 \Delta T + 1,7 \Delta T^{0,333}, \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{K)},$$

где $\Delta T = (T_{\text{воз}} - T_{\text{ст}})$ – разность температур воздуха и материала образца, стены ограждающей конструкции или оконного стекла; $T_{\text{ст}}$ – температура материала, изделия менялась от -6 до $+25$ °C; $T_{\text{воз}}$ – температура воздуха менялась от $+6$ до $+30$ °C.

Удельный тепловой поток q , от воздуха к наружной поверхности материала образца, стены или оконного стекла, при разности температур между воздухом и поверхностью стены или оконного стекла может быть представлен трехчленом вида

$$q = 4,6 \Delta T + 0,035 \Delta T^2 + 1,7 \Delta T^{1,333}, \text{ Вт/м}^2. \quad (4.2.2)$$

На рис. 4.2.2 представлен график для определения плотности теплового потока q , от воздуха к наружной поверхности материала образца, стены или оконного стекла, в зависимости от температурного напора ΔT .

3 Коэффициент теплоотдачи от нагретой поверхности материала, образца, ограждения к воздуху и окружающим предметам имеет зависимость

$$\alpha_{\text{общ}} = 4,6 + 0,035 \Delta T + 1,5 \Delta T^{0,333}, \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}),$$

где $\Delta T = T_{\text{гр}} - T_{\text{воз}}$; $T_{\text{гр}}$ – температура поверхности образца, ограждения менялась от -10 до $+100$ °С; $T_{\text{воз}}$ – температура воздуха, менялась от -10 до $+30$ °С.

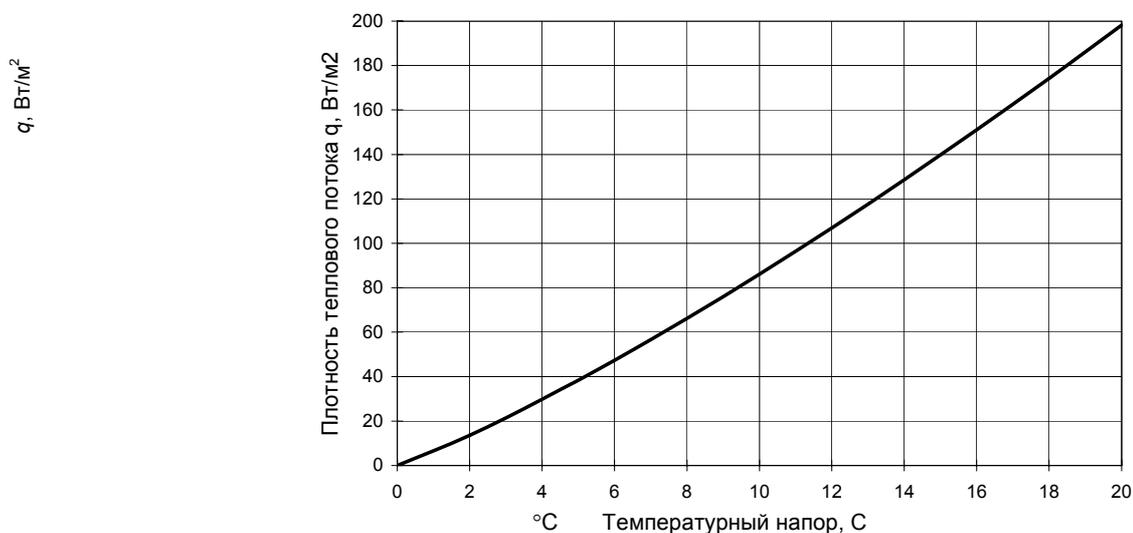


Рис. 4.2.2. Зависимость удельного теплового потока q , Вт/м²,

от температурного напора ΔT , °С

от воздуха к наружной поверхности материала, образца,

стены или оконного стекла:

$$q = 4,6 \Delta T + 0,035 \Delta T^2 + 1,7 \Delta T^{1,333};$$

ΔT – температурный напор от воздуха к поверхности материала, образца, стены, оконного стекла

Удельный тепловой поток q , от нагретой поверхности образца к воздуху может быть представлен трехчленом вида

$$q = 4,6 \Delta T + 0,035 \Delta T^2 + 1,5 \Delta T^{1,333}, \text{ Вт}/\text{м}^2. \quad (4.2.3)$$

На рис. 4.2.3 представлен график для определения плотности теплового потока q , от нагретых наружных поверхностей материала, образца, изделия, ограждения зданий и сооружений к воздуху в зависимости от температурного напора ΔT .

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 температурного напора ΔT или непосредственно измеренных температур наружной поверхности материала, образца, изделия, стекла окна, ограждения здания и сооружения, воздуха, а также экспериментальной установки (рис. 3.1.1).

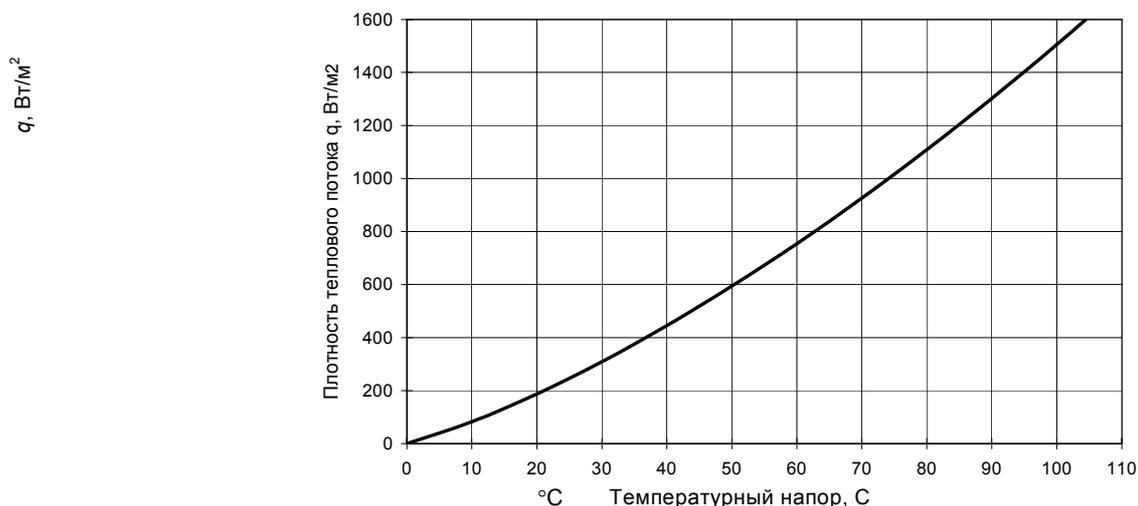


Рис. 4.2.3. Зависимость удельного теплового потока q , Вт/м²

от температурного напора ΔT , °C

нагретой поверхности и воздуха:

$$q = 4,6\Delta T + 0,035\Delta T^2 + 1,5\Delta T^{1,333};$$

ΔT – температурный напор от нагретой поверхности образца,

материала, ограждения к воздуху и окружающим предметам

Результаты математических расчетов и графических построений плотности теплового потока q , служат теоретической и прикладной основой для разработки и конструирования переносных приборов с автономным источником питания и без него для ускоренного определения удельного теплового потока и потерь тепла через остекление, а также от наружных ограждений зданий и сооружений.

4.3. МЕТОДИКА КОМПЛЕКСНОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК МАТЕРИАЛОВ МЕТОДОМ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ

При симметричном нагревании или охлаждении призмы квадратного сечения достаточно, чтобы длина призмы превышала размеры сторон грани $2R$ в шесть и более раз. Наиболее истинная температура поверхности призмы будет температура на середине ее грани $T_{гр}$, так как на температуру ребра призмы воздействует температурное поле, определяемое на основе принципа перемножения температурных критериев.

Для экспериментального определения коэффициента температуропроводности a , теплопроводности λ и объемной теплоемкости (c_p) материалов, возможен один из двух любых вариантов.

Первый вариант проведения эксперимента и комплексного определения ТФХ материалов.

Нагревание образца – призмы квадратного сечения в экспериментальной установке от начальной ее температуры T_0 (например, от комнатной) до температуры экспериментальной установки $T_{нагр} \approx 80...100$ °C (или любой другой температуры). Причем при нагревании образца строго заданной или определенной температуры в установке не предусматривается. Единственным условием при нагревании образца – чтобы температура в экспериментальной установке была не выше $\approx 0,7...0,8$ температуры термодеструкции исследуемого материала, при которой возможно разрушение (плавление, горение и т.д.) образца.

В этом варианте нагрев призмы квадратного сечения осуществляют при условии создания максимального теплового потока на поверхности образца, который возможен в предварительно прогретой экспериментальной установке. То есть, вначале установка без образца, предварительно прогревают до

определенной температуры (например, до $T_{\text{нагр}} \approx 80 \dots 100$ °С), а затем в нее помещают призму квадратного сечения, которая нагревается симметрично в установке от начальной (или комнатной) температуры за счет конвекции и радиации одновременно.

Последовательность проведения опыта следующая: первоначально включают нагреватель печи и температура установки начинает расти пока без опытного образца. Одновременно начинают подготовку образца к испытанию: на ребро и среднюю часть его грани укрепляют рамку с контактными термодатчиками, спаи которых должны быть прижаты строго к ребру и центру грани призмы квадратного сечения. Контактные термодатчики располагают по изотермам призмы и выводят через крышку установки, где подключают к регистрирующему прибору. Замеряют начальную температуру T_0 призмы квадратного сечения на середине грани, т.е. $T_0 = T_{\text{гр}}$. Замеряют и начальную температуру внутренней нагревательной поверхности $T_{\text{нагр}}$ или нагретой среды (воздуха) установки.

После прогрева установки до требуемой или заданной температуры (например, $T_{\text{нагр}} \approx 80 \dots 100$ °С) образец – призму с установленными контактными термодатчиками помещают в объем печи (рис 3.1.1). После начала нагрева в установке осуществляют измерение во времени температур ребра T_p и середины грани $T_{\text{гр}}$ призмы квадратного сечения.

Второй вариант проведения эксперимента комплексного определения ТФХ материалов.

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. Замеряют начальную максимальную температуру T_0^{max} призмы квадратного сечения, равную в начальный момент охлаждения температуре середины грани, т.е. $T_0^{\text{max}} = T_{\text{гр}}$. Замеряют также и температуру наружного воздуха $T_{\text{возд}}$, при которой производят охлаждение образца.

Например, после предварительного прогрева образца до температурного термодинамического равновесия $T_0^{\text{max}} \approx 80 \dots 100$ °С производят его охлаждение на воздухе при естественной конвекции и комнатной температуре $T_{\text{возд}} \approx 20$ °С. Единственное условие при охлаждении образца на воздухе – чтобы не было вынужденного движения воздуха (что самое простое), что нарушит условие симметричного охлаждения и внесет погрешность в определение ТФХ исследуемого материала. После начала охлаждения на воздухе измеряют во времени температуры ребра T_p и середины грани $T_{\text{гр}}$ призмы квадратного сечения.

В процессе нагрева или охлаждения призмы квадратного сечения измеряют изменение во времени температур ребра T_p и середины грани $T_{\text{гр}}$ исследуемой призмы определяют наступление упорядоченного теплового режима в исследуемой призме, когда скорость изменения температурного комплекса Φ во времени достигнет постоянного значения ($\Delta\Phi / \Delta\tau = \text{const}$), а искомый коэффициент температуропроводности исследуемого материала определяют по формуле

$$a = \frac{\Delta\Phi R_*^2}{\Delta\tau \cdot 4,94}, \quad (4.3.1)$$

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

Температурный комплекс Φ при нагревании призмы квадратного сечения определяют по формуле

$$\Phi = \ln(T_p - T_{\text{гр}}) - 1,23 \int \frac{dT_p}{T_p - T_{\text{гр}}}. \quad (4.3.2)$$

При охлаждении призмы Φ определяют по формуле

$$\Phi = \ln(T_{\text{гр}} - T_p) - 1,23 \int \frac{dT_p}{T_{\text{гр}} - T_p}. \quad (4.3.3)$$

Угловой коэффициент прямой линии $\Delta\Phi / \Delta\tau$ в области упорядоченного теплового режима определяют графически или в процессе математических расчетов, как описано в разд. 3.2 и 3.3.

Максимальная плотность теплового потока q_n^{\max} на поверхности призмы квадратного сечения при ее симметричном нагревании зависит от температуры среды в экспериментальной установке $T_{\text{нагр}}$ и начальной температуры образца T_0 , равной в начальный момент времени нагрева температуре образца в середине ее грани $T_{\text{гр}}$, т.е. $T_0 = T_{\text{гр}}$.

Максимальная плотность теплового потока q_n^{\max} на поверхности призмы квадратного сечения при ее симметричном охлаждении зависит от температуры наружного воздуха $T_{\text{возд}}$, при которой производят охлаждение образца и начальной максимальной температуры T_0^{\max} , полученной в процессе прогрева призмы до термодинамического температурного равновесия в экспериментальной установке, равной в начальный момент времени охлаждения температуре образца в середине ее грани $T_{\text{гр}}$, т.е. $T_0^{\max} = T_{\text{гр}}$.

Максимальную плотность теплового потока на поверхности призмы квадратного сечения в начальном периоде нагрева или охлаждения определяют по графикам или формулам:

- при нагревании образца в предварительно прогретой установке (для первого варианта проведения эксперимента) возможно использование графика (рис. 4.2.1) или формулы (4.2.1):

$$q_n^{\max} = 4,6 \Delta T + 0,035 \Delta T^2 + \Delta T^{1,333},$$

а температурный напор в начальном периоде $\Delta T = T_{\text{нагр}} - T_0 = T_{\text{нагр}} - T_{\text{гр}}$;

- при охлаждении на воздухе предварительно прогретого образца (для второго варианта проведения эксперимента) возможно использование графика (рис. 4.2.3) или формулы (4.2.3):

$$q_n^{\max} = 4,6 \Delta T + 0,035 \Delta T^2 + 1,5 \Delta T^{1,333}$$

а температурный напор в начальном периоде $\Delta T = T_0^{\max} - T_{\text{возд}} = T_{\text{гр}} - T_{\text{возд}}$.

Амплитуда колебаний температурной полуволны при воздействии теплового потока на поверхности призмы квадратного сечения для каждого текущего периода времени определяют согласно рис. 4.1.1.

В процессе нагрева призмы квадратного сечения амплитуда колебаний температурной полуволны на ее поверхности определяют из соотношения

$$\vartheta_n = 0,5 [T_{\text{гр}}(\tau_{\text{зад1}}) - T_0], \quad (4.3.4)$$

где $T_{\text{гр}}(\tau_{\text{зад1}})$ – температура середины грани исследуемой призмы в заданный момент времени ($\tau_{\text{зад1}}$) при наступлении упорядоченного теплового режима; T_0 – начальная температура призмы,

В процессе охлаждения призмы квадратного сечения амплитуда колебаний температурной полуволны на ее поверхности определяют из соотношения

$$\vartheta_n = 0,5 [T_0^{\max} - T_{\text{гр}}(\tau_{\text{зад2}})], \quad (4.3.5)$$

где T_0^{\max} – максимальная температура призмы, полученная при ее нагревании до термодинамического равновесия; $T_{\text{гр}}(\tau_{\text{зад2}})$ – температура середины грани призмы в заданный момент времени ($\tau_{\text{зад2}}$) при наступлении упорядоченного теплового режима в призме.

Объемную теплоемкость (c_p) исследуемого материала, выполненного в виде призмы квадратного сечения, определяют из соотношения:

- при симметричном нагревании призмы

$$(c_p) = \frac{q_n^{\max}}{\vartheta_n \sqrt{\frac{a \pi}{\tau_{\text{зад1}}}}}, \quad (4.3.6)$$

- при симметричном охлаждении призмы

$$(c_p) = \frac{q_n^{\max}}{\vartheta_n \sqrt{\frac{a \pi}{\tau_{\text{зад}}^2}}} \quad (4.3.7)$$

Далее, используя полученную информацию о температуропроводности и объемной теплоемкости, определяют теплопроводность исследуемого материала по соотношению $\lambda = a(c_p)$.

Для повышения точности результатов измерения за счет уменьшения доли случайной составляющей в общей погрешности измерений за окончательные искомые теплофизические характеристики следует принимать средние значения, полученные на стадии нагрева и охлаждения исследуемого образца. Результаты измерений температур и расчетов коэффициента температуропроводности a , теплопроводности λ и объемной теплоемкости (c_p) различных строительных, теплоизоляционных и других материалов представлены ниже в виде таблиц, графиков и приложений.

4.4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК МАТЕРИАЛОВ

4.4.1. Расчет теплофизических характеристик бетона

Для определения ТФХ строительных, теплоизоляционных и других материалов воспользуемся экспериментальной установкой, конструкция которой описана в разд. 3.1 и показана на рис. 3.1.1. Для исследования была изготовлена призма из бетона на портландцементе длиной 350 мм и шириной грани $2R = 50$ мм с шамотным заполнителем (цемент – 400 кг/м³, тонкомолотая шамотная добавка – 80 кг/м³, шамотный песок – 740 кг/м³, шамотный щебень – 400 кг/м³, В/Ц = 0,6).

Для измерения температур ребра и середины грани методом неразрушающего контроля на призме квадратного сечения закреплялись термопары с использованием контактного устройства (разд. 3.7), схема которого приведена на рис. 3.7.1. Расстояние между термопарами было взято $R = 0,024$ м.

Для комплексного определения ТФХ бетона установку (цилиндрическую печь) вначале прогрели до того момента, пока температура среды внутри печи $T_{\text{нагр}}$ установится постоянной. Ввиду того, что боковые экраны выполнены из листового алюминия, установка выходит в рабочий режим в течение короткого времени ($\approx 20 \dots 30$ мин), а температура среды внутри печи $T_{\text{нагр}}$ составила 97 °С.

Подготовленная к опыту призма из бетона с установленными на ней двумя термопарами поместили в испытательную цилиндрическую камеру и симметрично нагревали от начальной комнатной температуры $T_0 = 23$ °С.

В табл. 17П представлены результаты экспериментальных измерений температур ребра призмы квадратного сечения T_r и середины ее грани $T_{гр}$, а также расчеты по формуле (4.3.2) температурного комплекса Φ для каждого значения времени τ . Выполнены и расчеты по формуле (4.3.1) коэффициента температуропроводности a бетона для каждого промежутка времени $\Delta\tau$ в течение 12 мин.

Из вычислений видно, что коэффициент температуропроводности бетона с шамотным заполнителем, начиная со времени $\tau = 360$ с, становится равным $a = 0,494 \cdot 10^{-6}$ м²/с и повторяет свои истинные значения для каждого последующего промежутка времени $\Delta\tau$. Анализ вычислений также указывает, что до времени $\tau = 360$ с длится начальная стадия нагрева, а затем начинается упорядоченный тепловой режим.

Полученное из опыта значение коэффициента температуропроводности $a = 0,495 \cdot 10^{-6}$ м²/с используется в дальнейшем для расчета значений объемной теплоемкости (c_p) и теплопроводности λ бетона.

Плотность теплового потока q_n^{\max} на поверхности призмы квадратного сечения из бетона в начальном периоде нагревания возможно определить графически по (рис. 4.2.1) или по формуле (4.2.1) при максимальном температурном напоре на поверхности образца, когда призму помещали в прогретую установку, т.е. $\Delta T = T_{\text{нагр}} - T_0 = 97 - 23 = 74$ °С,

$$q_n^{\max} = 4,6 \Delta T + 0,035 \Delta T^2 + \Delta T^{1,333} = 840 \text{ Вт/м}^2.$$

Результаты расчета объемной теплоемкости и коэффициента теплопроводности по температурному полю на поверхности при нагревании бетона при $T_0 = 23 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_{\text{нагр}} = 97 \text{ }^\circ\text{C}$, $\Delta T = 74 \text{ }^\circ\text{C}$, $q_{\text{п}}^{\text{max}} = 840 \text{ Вт/м}^2$, коэффициенте температуропроводности $a = 0,495 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ сведены в табл. 4.4.1.

Для повышения точности результатов измерения за счет уменьшения доли случайной составляющей в общей погрешности измерений был также проведен эксперимент с охлаждением бетона. Для этого призму квадратного сечения из бетона, нагретую в печи до термодинамического температурного равновесия $T_0^{\text{max}} = 94 \text{ }^\circ\text{C}$, охлаждали на воздухе при температуре $T_{\text{возд}} = 27 \text{ }^\circ\text{C}$ и естественной конвекции.

4.4.1. Расчет объемной теплоемкости и коэффициента теплопроводности по температурному полю

на поверхности при нагревании бетона при $T_0 = 23 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_{\text{нагр}} = 97 \text{ }^\circ\text{C}$, $\Delta T = 74 \text{ }^\circ\text{C}$, $q_{\text{п}}^{\text{max}} = 840 \text{ Вт/м}^2$, $a = 0,495 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$

Время $\tau_{\text{зад1}}$, с	$T_{\text{гр}}$, $^\circ\text{C}$	$\vartheta_{\text{п}} = 0,5 [T_{\text{гр}} (\tau_{\text{зад1}}) - T_0]$	$(c_p) = \frac{q_{\text{п}}^{\text{max}}}{\vartheta_{\text{п}} \sqrt{\frac{a \pi}{\tau_{\text{зад1}}}}}$, кДж / (м ³ · К)	$\lambda = a (c_p)$, Вт/(м · К)
180	34,0	5,5	1630	0,81
270	36,5	6,75	1627	0,81
360	39,0	8,0	1612	0,81
450	41,0	9,0	1581	0,80
540	43,0	10,0	1555	0,78

В табл. 18П представлены результаты экспериментального измерения температур ребра призмы $T_{\text{р}}$ и середины ее грани $T_{\text{гр}}$, а также расчеты по формуле (4.3.3) температурного комплекса Φ для каждого значения времени τ и расчеты по формуле (4.3.1) коэффициента температуропроводности при охлаждении бетона для каждого промежутка времени Δt в течение 20 мин. Полученное из опыта значение коэффициента температуропроводности $a = 0,465 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ используется для расчета значений объемной теплоемкости (c_p) и теплопроводности λ бетона. Анализ вычислений также указывает, что при $\tau = 300$ с начинается упорядоченный тепловой режим.

Плотность теплового потока $q_{\text{п}}^{\text{max}}$ на поверхности призмы квадратного сечения из бетона в начальном периоде охлаждения возможно определить графически по (рис. 4.2.3) или по формуле (4.2.3) при максимальном температурном напоре на поверхности, когда прогретая призма вынимается из нагретой установки для последующего охлаждения на воздухе при естественной конвекции, т.е. $\Delta T = T_0^{\text{max}} - T_{\text{возд}} = 94 - 27 = 67 \text{ }^\circ\text{C}$, $q_{\text{п}}^{\text{max}} = 4,6 \Delta T + 0,035 \Delta T^2 + 1,5 \Delta T^{1,333} = 870 \text{ Вт/м}^2$.

Результаты расчета объемной теплоемкости и коэффициента теплопроводности по температурному полю на поверхности призмы при охлаждении бетона при $T_0^{\text{max}} = 94 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_{\text{возд}} = 27 \text{ }^\circ\text{C}$, $\Delta T = 67 \text{ }^\circ\text{C}$, $q_{\text{п}}^{\text{max}} = 870 \text{ Вт/м}^2$, коэффициенте температуропроводности $a = 0,465 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ сведены в табл. 4.4.2.

Из табличных значений [198, 221] для бетона имеем $\lambda = 0,8 \dots 0,84 \text{ Вт/(м · К)}$, $(c_p) = 1500 \dots 1850 \text{ кДж/(м}^3 \cdot \text{К)}$.

Методика определения ТФХ материалов более предпочтительна при охлаждении образца, так как позволяет определять плотность теплового потока $q_{\text{п}}^{\text{max}}$ на поверхности призмы квадратного сечения с помощью тепломера. В этом случае максимально обеспечиваются и теоретические предпосылки по условию симметричного охлаждения образца. Однако требуется повышенный (по сравнению с нагревом призмы) расход электроэнергии для предварительного прогрева образца.

4.4.2. Расчет теплофизических характеристик фторопласта

Для подтверждения методики были проведены опыты с охлаждением образца из фторопласта. Для исследования была изготовлена призма из фторопласта длиной 350 мм и шириной грани $2R = 28$ мм. Призму квадратного сечения из фторопласта вначале нагревали в печи до стационарного распределения температур на поверхности $T_0^{\max} = 99$ °С, а затем охлаждали на воздухе при комнатной температуре и естественной конвекции с $T_{\text{возд}} = 30$ °С. Расстояние между термопарами составило $R = 0,0135$ м.

4.4.2. Расчет объемной теплоемкости и коэффициента теплопроводности по температурному полю на поверхности при охлаждении бетона при $T_0^{\max} = 94$ °С, $T_{\text{возд}} = 27$ °С, $\Delta T = 67$ °С, $q_n^{\max} = 870$ Вт/м², $a = 0,465 \cdot 10^{-6}$ м²/с

Время $\tau_{\text{зад2}}$, с	$T_{\text{гр}}$, °С	$\vartheta_n = 0,5 [T_0^{\max} - T_{\text{гр}} (\tau_{\text{зад2}})]$	$(c_p) = \frac{q_n^{\max}}{\vartheta_n \sqrt{\frac{a\pi}{\tau_{\text{зад2}}}}}$, кДж/(м ³ ·К)	$\lambda = a(c_p)$, Вт/(м·К)
150	83,0	5,50	1617	0,75
300	79,5	7,25	1726	0,80
450	76,5	8,75	1752	0,81
600	73,5	10,25	1727	0,80
750	71,0	11,5	1723	0,80

В табл. 9П представлены результаты экспериментального измерения температур ребра призмы T_p и середины ее грани $T_{\text{гр}}$, а также расчеты по формуле (4.3.3) температурного комплекса Φ для каждого значения времени τ и расчеты по формуле (4.3.1) коэффициента теплопроводности фторопласта для каждого промежутка времени Δt в течение 30 мин.

Полученное из опыта значение коэффициента теплопроводности $a = 0,125 \cdot 10^{-6}$ м²/с используется для расчета значений объемной теплоемкости (c_p) и теплопроводности λ фторопласта.

Плотность теплового потока q_n^{\max} на поверхности призмы квадратного сечения из фторопласта в начальном периоде охлаждения определяется тепломером, графически (рис. 4.2.3) или по формуле (4.2.3) при максимальном температурном напоре на поверхности, когда прогретая призма вынимается из нагретой установки, т.е. $\Delta T = T_0^{\max} - T_{\text{возд}} = 99 - 30 = 69$ °С, $q_n^{\max} = 4,6 \Delta T + 0,035 \Delta T^2 + 1,5 \Delta T^{1,333} = 910$ Вт/м².

Результаты расчета объемной теплоемкости и коэффициента теплопроводности по температурному полю на поверхности призмы при охлаждении бетона при $T_0^{\max} = 99$ °С, $T_{\text{возд}} = 30$ °С, $\Delta T = 69$ °С, $q_n^{\max} = 910$ Вт/м², коэффициенте теплопроводности $a = 0,125 \cdot 10^{-6}$ м²/с сведены в табл. 4.4.3.

4.4.3. Расчет объемной теплоемкости и коэффициента теплопроводности по температурному полю на поверхности при охлаждении фторопласта для $T_0^{\max} = 99$ °С, $T_{\text{возд}} = 30$ °С, $\Delta T = 69$ °С, $q_n^{\max} = 910$ Вт/м², $a = 0,125 \cdot 10^{-6}$ м²/с

Время $\tau_{\text{зад2}}$, с	$T_{\text{гр}}$, °С	$\vartheta_n = 0,5 [T_0^{\max} - T_{\text{гр}} (\tau_{\text{зад2}})]$	$(c_p) = \frac{q_n^{\max}}{\vartheta_n \sqrt{\frac{a\pi}{\tau_{\text{зад2}}}}}$, кДж/(м ³ ·К)	$\lambda = a(c_p)$, Вт/(м·К)
200	76,0	11,5	1786	0,223
400	66,0	16,5	1761	0,220
600	61,0	19,0	1872	0,233

800	57,0	21,0	1952	0,244
1000	54,0	22,5	2040	0,255

Из табличных значений [198] для фторопласта $\lambda = 0,22... 0,25 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ и $(c_p) = 1700...2000 \text{ кДж}/(\text{м}^3 \cdot \text{К})$.

4.4.3. Расчет теплофизических характеристик силикатного кирпича

Для комплексного определения ТФХ силикатного кирпича установку (цилиндрическую печь) вначале прогрели до того момента, пока температура среды внутри печи $T_{\text{нагр}}$ установилась постоянной и составила $80 \text{ }^\circ\text{C}$. Подготовленная к опыту призма из силикатного кирпича с установленными на ней двумя контактными термопарами поместили в испытательную цилиндрическую камеру и симметрично нагревали от начальной комнатной температуры $T_0 = 16 \text{ }^\circ\text{C}$.

В табл. 14П представлены результаты экспериментальных измерений температур ребра призмы квадратного сечения T_p и середины ее грани $T_{гр}$, а также расчеты по формуле (4.3.2) температурного комплекса Φ для каждого значения времени τ . Выполнены и расчеты по формуле (4.3.1) коэффициента температуропроводности a силикатного кирпича для каждого промежутка времени $\Delta\tau$ в течение 700 с.

Из вычислений видно, что коэффициент температуропроводности силикатного кирпича со времени $\tau = 300$ с становится равным $a = 0,547 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ и повторяет свои истинные значения для каждого последующего промежутка времени $\Delta\tau$. Полученное из опыта значение коэффициента температуропроводности $a = 0,542 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ используется в дальнейшем для расчета значений объемной теплоемкости (c_p) и теплопроводности λ силикатного кирпича.

Плотность теплового потока $q_{п}^{\text{max}}$ на поверхности призмы квадратного сечения из силикатного кирпича в начальном периоде нагрева возможно определить графически по (рис. 4.2.1) или по формуле (4.2.1) при максимальном температурном напоре на поверхности образца, когда призму помещали в прогретую установку, т.е. $\Delta T = T_{\text{нагр}} - T_0 = 80 - 16 = 64 \text{ }^\circ\text{C}$,

$$q_{п}^{\text{max}} = 4,6 \Delta T + 0,035 \Delta T^2 + \Delta T^{1,333} = 693 \text{ Вт}/\text{м}^2.$$

Результаты расчета объемной теплоемкости и коэффициента теплопроводности по температурному полю на поверхности при нагревании силикатного кирпича при $T_0 = 16 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_{\text{нагр}} = 80 \text{ }^\circ\text{C}$, $\Delta T = 64 \text{ }^\circ\text{C}$, $q_{п}^{\text{max}} = 693 \text{ Вт}/\text{м}^2$, коэффициенте температуропроводности $a = 0,542 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ сведены в табл. 4.4.4.

Из табличных значений [198, 221] для силикатного кирпича $(c_p) = 1650...1800 \text{ кДж}/(\text{м}^3 \cdot \text{К})$, $\lambda = 0,81...1,0 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$.

4.4.4. Расчет объемной теплоемкости и коэффициента теплопроводности по температурному полю на поверхности при нагревании силикатного кирпича для

$T_0 = 16 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_{\text{нагр}} = 80 \text{ }^\circ\text{C}$, $\Delta T = 64 \text{ }^\circ\text{C}$, $q_{п}^{\text{max}} = 693 \text{ Вт}/\text{м}^2$, $a = 0,542 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$

Время $\tau_{\text{зад1}}$, с	$T_{гр}$, $^\circ\text{C}$	$\Theta_{п} = 0,5 [T_{гр} (\tau_{\text{зад1}}) - T_0]$	$(c_p) = \frac{q_{п}^{\text{max}}}{\Theta_{п} \sqrt{\frac{a \pi}{\tau_{\text{зад1}}}}}$, $\text{кДж}/(\text{м}^3 \cdot \text{К})$	$\lambda = a (c_p)$, $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$
200	24	4	1823	0,98
300	26	5	1777	0,96
400	28	6	1732	0,94
500	30	7	1650	0,89

600	32	8	1575	0,85
-----	----	---	------	------

4.4.4. Расчет теплофизических характеристик красного кирпича

Для комплексного определения ТФХ красного кирпича установку (цилиндрическую печь) вначале прогрели до того момента, пока температура среды внутри печи $T_{\text{нагр}}$ установилась постоянной и составила

99 °С. Подготовленная к опыту призма из красного кирпича с установленными на ней двумя контактными термопарами поместили в испытательную цилиндрическую камеру и симметрично нагревали от начальной комнатной температуры $T_0 = 20$ °С.

В табл. 13П представлены результаты экспериментальных измерений температур ребра призмы квадратного сечения T_p и середины ее грани $T_{гр}$, а также расчеты по формуле (4.3.2) температурного комплекса Φ для каждого значения времени τ . Выполнены и расчеты по формуле (4.3.1) коэффициента температуропроводности a красного кирпича для каждого промежутка времени Δt в течение 1000 с.

Из вычислений видно, что коэффициент температуропроводности красного кирпича со времени $\tau = 400$ с становится равным $a = 0,381 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ и повторяет свои истинные значения для каждого последующего промежутка времени Δt . Полученное из опыта значение коэффициента температуропроводности $a = 0,393 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ используется в дальнейшем для расчета значений объемной теплоемкости (c_p) и теплопроводности λ красного кирпича.

Плотность теплового потока $q_{\text{п}}^{\text{max}}$ на поверхности призмы квадратного сечения из красного кирпича в начальном периоде нагрева возможно определить графически по (рис. 4.2.1) или по формуле (4.2.1) при максимальном температурном напоре на поверхности образца, когда призму помещали в прогретую установку, т.е. $\Delta T = T_{\text{нагр}} - T_0 = 99 - 20 = 79$ °С, $q_{\text{п}}^{\text{max}} = 4,6\Delta T + 0,035\Delta T^2 + \Delta T^{1,333} = 920 \text{ Вт}/\text{м}^2$.

Результаты расчета объемной теплоемкости и коэффициента теплопроводности по температурному полю на поверхности при нагревании красного кирпича при $T_0 = 20$ °С, $T_{\text{нагр}} = 99$ °С, $\Delta T = 79$ °С, $q_{\text{п}}^{\text{max}} = 920 \text{ Вт}/\text{м}^2$, коэффициенте температуропроводности $a = 0,393 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ сведены в табл. 4.4.5.

Из табличных значений [198, 221] для красного кирпича известно, что (c_p) = 1500...1700 кДж/(м³ · К), $\lambda = 0,6...0,8 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$.

Из полученных экспериментальных данных следует, что методика неразрушающего контроля, основанная на измерении только двух температур на поверхности призмы квадратного сечения (ребра и середины грани), позволяет определять целый комплекс теплофизических

4.4.5. Расчет объемной теплоемкости и

коэффициента теплопроводности по температурному полю

на поверхности при нагревании красного кирпича при $T_0 = 20$ °С, $T_{\text{нагр}} = 99$ °С, $\Delta T = 79$ °С, $q_{\text{п}}^{\text{max}} = 920 \text{ Вт}/\text{м}^2$, $a = 0,393 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$

Время $\tau_{\text{зад1}}$, с	$T_{гр}$, °С	$\vartheta_{\text{п}} = 0,5 [T_{гр} (\tau_{\text{зад1}}) - T_0]$	$(c_p) = \frac{q_{\text{п}}^{\text{max}}}{\vartheta_{\text{п}} \sqrt{\frac{a \pi}{\tau_{\text{зад1}}}}}$, кДж/(м ³ · К)	$\lambda = a (c_p)$, Вт/(м · К)
200	34,5	7,25	1662	0,65
300	38	9	1621	0,64
400	40,5	10,25	1600	0,63
500	42,5	11,25	1621	0,64
600	44,5	12,25	1662	0,65

700	46,5	13,25	1650	0,65
800	48,2	14,1	1665	0,65
900	50	15	1662	0,65

характеристик материалов: коэффициент температуропроводности a , объемную теплоемкость (c_p) и теплопроводность λ материалов. Из полученных экспериментальных данных также следует, что относительная погрешность измерения коэффициента температуропроводности, объемной теплоемкости и теплопроводности разработанного способа неразрушающего контроля, использующая упорядоченный тепловой режим в призме квадратного сечения, составляет не более 5 %, тогда как в аналогах относительная погрешность составляет не менее 8...10 %.

4.5. МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ И СООРУЖЕНИЙ

Для определения теплотехнических характеристик ограждающих конструкций зданий и сооружений выбрана ограждающая стена жилого здания. Используя переносной тепломер, сделаны замеры плотности теплового потока на поверхности ограждения здания в течение суток через каждые четыре часа: 2, 6, 10, 14, 18, 22 ч.

Максимальная плотность теплового потока q_n^{\max} на внутренней поверхности ограждения здания наблюдается в ночные часы до 6 часов утра и составила 20 Вт/м². Температура внутри помещения здания в эти часы была $T_{\text{вн}} = 25$ °С, а снаружи здания $T_{\text{нар}} = 5$ °С.

Используя график плотности теплового потока от воздуха к наружной поверхности стены (рис. 4.2.2), при $q_n = 20$ Вт/м², определялся температурный напор ΔT или разность температур между поверхностью внутренней стены и окружающим воздухом, который составил $\Delta T = 3$ °С. Следовательно, в ночные часы при максимальной плотности теплового потока температура внутренней стены ограждения составляла $T_{\text{ст1}} = T_{\text{вн}} - \Delta T = 25 - 3 = 22$ °С, а наружной стены ограждения

$$T_{\text{ст2}} = T_{\text{нар}} + \Delta T = 5 + 3 = 8$$
 °С.

Толщина однородной стены здания составила $\delta = 0,51$ м. Используя закон теплопроводности Фурье, определяется коэффициент теплопроводности ограждения по формуле $\lambda = (q_n^{\max} \delta) / (T_{\text{ст1}} - T_{\text{ст2}})$.

Для полученных условий коэффициент теплопроводности ограждения составил $\lambda = (20 \cdot 0,51) / (22 - 8) = 0,73$ Вт/(м·К).

Минимальная плотность теплового потока q_n^{\min} , измеренная тепломером на наружной поверхности ограждения здания, наблюдается в дневные часы до 14 часов и составила $q_n = 17,5$ Вт/м². Температура наружного воздуха в дневные часы поднялась до $T_{\text{нар}} = 10$ °С.

Используя график плотности теплового потока от воздуха к наружной поверхности стены (рис. 4.2.2) при $q_n = 17,5$ Вт/м², определялся температурный напор ΔT или разность температур

между поверхностью наружной стены и окружающим воздухом, который составил $\Delta T = 2,5$ °С. Следовательно, в дневные часы при минимальной плотности теплового потока температура наружной стены ограждения составляла $T_{ст3} = T_{нар} + \Delta T = 10 + 2,5 = 12,5$ °С.

Максимальная амплитуда колебаний температурной полуволны на наружной поверхности ограждения здания между 6 и 14 часами составила

$$\vartheta_{п}^{\max} = 0,5 (T_{ст3} - T_{ст2}) = 0,5 (12,5 - 8) = 2,25 \text{ °С.}$$

Коэффициент теплоусвоения ограждения определяется по формуле (4.1.5) и составил $B = q_{п}^{\max} / \vartheta_{п}^{\max} = 20 / 2,25 = 9$ Вт/(м² · К).

Ранее (формула 4.1.6) установлено, что коэффициент теплоусвоения

$$B = \sqrt{\lambda (c\rho) \omega},$$

где $(c\rho)$ – объемная теплоемкость материала; $\omega = 2\pi / z$ – частота колебаний температуры, z – полный период колебаний температурной волны.

Полный период колебаний температуры на наружной поверхности ограждения составляет 24 часа или 86 400 с. Тогда объемная теплоемкость $(c\rho)$ ограждающей конструкции определится из выражения

$$\begin{aligned} (c\rho) &= (B^2 z) / (\lambda \cdot 2\pi) = (81 \cdot 86\,400) / (0,73 \cdot 2 \cdot 3,14) = \\ &= 1\,530\,000 \text{ Дж}/(\text{м}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{К}), \end{aligned}$$

или

$$(c\rho) = 1530 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}).$$

Коэффициент температуропроводности a ограждения здания определится из соотношения

$$a = \lambda / (c\rho) = 0,73 / 1\,530\,000 = 0,477 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}.$$

Полученные значения коэффициентов теплопроводности, объемной теплоемкости и температуропроводности ограждающих конструкций здания с использованием тепломера соответствуют кладке из бетона [12, 82, 83, 221].

Из полученных экспериментальных данных следует, что методика неразрушающего контроля, основанная на измерении плотности теплового потока, позволяет определять целый комплекс теплофизических характеристик материалов: коэффициент температуропроводности a , объемную теплоемкость $(c\rho)$ и теплопроводность λ материалов.

4.6. МИКРОПРОЦЕССОРНЫЙ ТЕПЛОМЕР ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ПЛОТНОСТИ ТЕПЛОВЫХ ПОТОКОВ НА ПОВЕРХНОСТИ МАТЕРИАЛОВ И ИЗДЕЛИЙ

Решение проблемы энергосбережения и снижения потерь теплоты в окружающую среду связано не только с определением ТФС исследуемых строительных материалов и готовых изделий из них, но и с измерением тепловых потоков с поверхности этих объектов. Для решения этой задачи необходимо разработать портативные микропроцессорные приборы или информационные измерительные системы (ИИС), которые с необходимой для теплотехнических измерений точностью и оперативностью позволили бы определить плотность тепловых потоков с наружной поверхности ограждающей конструкции зданий, сооружений, оконных блоков и т.д.

На рис. 4.6.1 представлена функциональная схема микропроцессорной ИИС для измерения плотности тепловых потоков с поверхности строительных материалов, ограждающих конструкций зданий и сооружений, реализующая алгоритмы определения тепловых потоков, основанные на методах, изложенных в параграфе 4.2.

В схеме тактовый генератор G предназначен для формирования двух тактовых последовательностей F1 и F2 для тактирования процессора CPU (Central Processor Unit), формирования сигнала сброса системы RESET и сигнала стробирования STSTB для системного контроллера SC (System Controller).

Центральный процессор управляет функционированием всей системы, а именно:

- контролирует температуру в заданных точках исследуемого объекта;
- формирует временную диаграмму обмена с аналого-цифровым преобразователем ADT (Analog-Digital Transformer) с помощью сигналов DR и ET, выдаваемых через порт IOP1 (Input Output Port 1);
- контролирует состояние кнопки "ПУСК" и активизирует цикл измерения только после ее нажатия;
- управляет "растяжкой" шкалы ADT с помощью сигнала LS (Lever Select), выдаваемого через порт IOP 2;
- осуществляет съем, обработку по алгоритму, размещенному в ROM и выдачу на индикацию данных, поступающих с ADT;
- осуществляет динамическую индикацию результатов измерения, температуры и режимов работы на четырехразрядном цифровом индикаторе DD (Digital Display). Динамическая индикация получается путем одновременной выдачи сигналов данных по шине ДАТА через

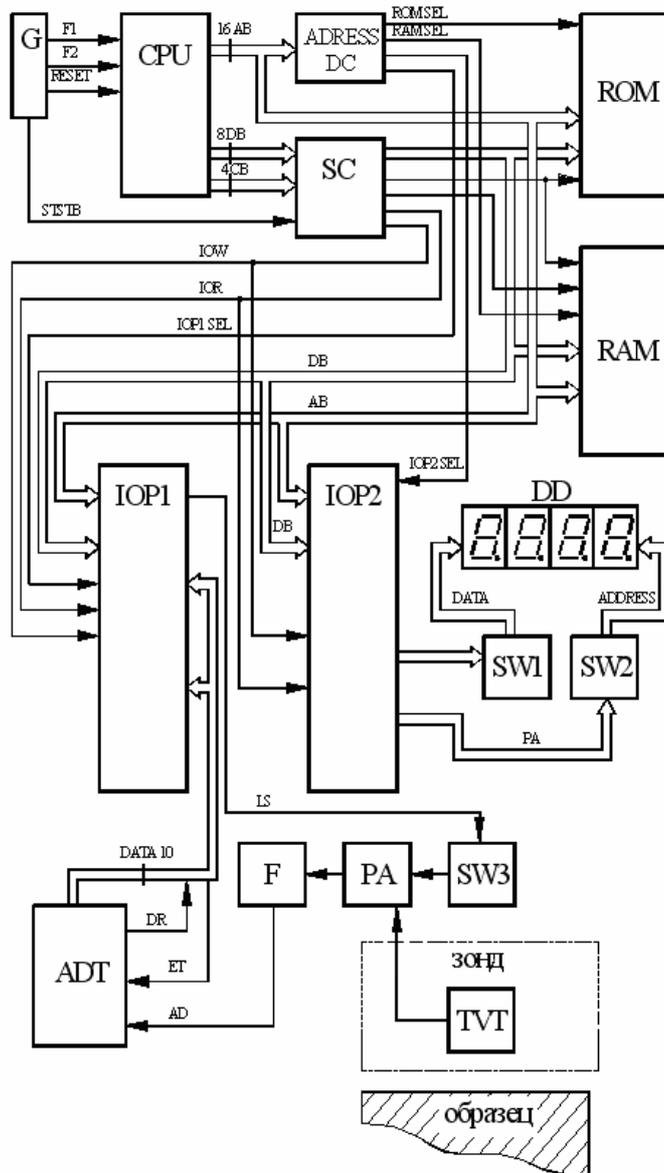


Рис. 4.6.1. Функциональная схема микропроцессорной ИИС для измерения плотности тепловых потоков с поверхности исследуемых объектов

ключи SW1, порт IOP 2 и выдачи позиционного кода через четырехразрядные ключи SW2 и порт IOP 2 на четыре семисегментных светодиодных индикатора DD.

Дешифратор адреса ADDRES DS предназначен для формирования сигналов ROM SEL, RAM SEL, IOP1 SEL, IOP2 SEL выбора соответствующего устройства.

Системный контроллер SC буферизирует шину данных системы и формирует сигналы MEMR (чтение памяти), MEMW (запись в память), IOR (чтение устройств ввода-вывода), IOW (запись в устройства ввода-вывода).

Постоянное запоминающее устройство ROM предназначено для хранения программного обеспечения системы, имеется возможность увеличения памяти ROM до 8 Кбайт.

Оперативное запоминающее устройство RAM предназначено для накопления и хранения промежуточных данных, результатов измерения.

Ключ SW3 представляет собой специальный прецизионный коммутатор опорных напряжений, управляется CPU по алгоритму, соответствующему методу определения искомой плотности теплового потока.

IOP1, IOP2 параллельные адапторы ввода-вывода предназначены для обмена сигналами и данными с внешними блоками и узлами системы.

Прецизионный усилитель PA предназначен для усиления сигналов микротермопар TVT, представляет собой сложную схему УПТ МДМ структуры и дифференциального усилительного каскада с автоматическим подавлением синфазной составляющей.

Фильтр F предназначен для ослабления высокочастотных помех, является ФНЧ второго порядка с управляемой крутизной среза АЧХ, выполняет коррекцию уровня сигналов датчиков.

Стабилизатор напряжения VS является источником питания, управляемым по заданному алгоритму центральным процессором.

Измерительный зонд выносной, представляет собой конструкцию, совмещающую в себе систему микротермопар TVT, соединенных по соответствующей коммутационной схеме. Зонд выполнен из теплоизоляционного и термостойкого материала и соединен с ИИС кабелем.

Программное обеспечение (ПО) контроллера написано на языке ассемблера по модульному принципу и поэтому может быть легко модифицировано под конкретную задачу пользователя.

Программное обеспечение 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 использовать 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.

Драйверы устройств ввода-вывода реализуют функцию стандартизации протокола обмена данными между физическими устройствами и программным обеспечением. Включение их в систему позволяет оперативно производить реконфигурацию системы при незначительном изменении ПО. Библиотека подпрограмм арифметики с плавающей запятой представляет собой набор стандартных подпрограмм для реализации операций над числами с плавающей запятой.

Любая подпрограмма из библиотеки может быть вызвана любой другой программой или подпрограммой при соблюдении соглашения об обмене данными.

Тестовое ПО предназначено для автоматической проверки работоспособности системы при включении и содержит в себе тест ОЗУ, тест ПЗУ (проверку контрольной суммы), тест устройств ввода-вывода и тест процессора.

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. CPU вырабатывает сигнал, по которому на четырехразрядном индикаторе DD высвечивается приглашение к работе. После установки зонда на исследуемое изделие или образец оператор нажимает кнопку "ПУСК", после чего начинается автоматически измерение плотности теплового потока по заданному алгоритму, хранящемуся в ROM.

Система опрашивает через порт IOP1 аналого-цифровой преобразователь, на котором присутствует аналоговый сигнал, усиленный в PA и представляющий собой ЭДС преобразователя TVT. Процессор

начинает обработку массива данных в соответствии с алгоритмом, изложенным в 4.2, а полученные значения высвечиваются на цифровом индикаторе DD в нормированном виде.

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 использовать систему для контроля изделий в условиях производства.

4.7. ВЫВОДЫ

1. Разработаны научно-методологические основы и приборное обеспечение для комплексного определения коэффициентов температуропроводности, теплопроводности и объемной теплоемкости материалов по температурным измерениям на поверхности призмы квадратного сечения.

Все графические построения и математические расчеты не представляют сложности и легко выполняются в программе Excel или других аналогичных программах ЭВМ.

2. **Разработан математический и графический метод определения плотности теплового потока на поверхности материалов и изделий. Способ неразрушающего контроля позволяет определять комплекс теплофизических характеристик ограждающих конструкций зданий и сооружений.**

Большим преимуществом разработанного способа неразрушающего контроля для комплексного определения коэффициентов температуропроводности, теплопроводности и объемной теплоемкости материалов по температурным измерениям на поверхности призмы квадратного сечения по сравнению с известными является:

- 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 измерения.

Кроме того, способ неразрушающего контроля комплекса теплофизических характеристик строительных материалов, позволяет легко автоматизировать теплофизический эксперимент, легко реализуется на базе микропроцессорной техники и поэтому является перспективным для использования в информационно-измерительных системах неразрушающего контроля ТФХ материалов, в строительной теплотехнике и различных отраслях народного хозяйства.

5. МЕТРОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И ПОГРЕШНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ МЕТОДОМ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ

5.1. КЛАССИФИКАЦИЯ ПОГРЕШНОСТЕЙ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ

Для измерений температуры среды, веществ и определения ТФХ строительных материалов и изделий необходимо иметь измерительный комплекс, функциональная схема которого включает следующие элементы:

- датчики, находящиеся в контакте с исследуемой средой (телом) и являющиеся своего рода "преобразователями" температуры в иную физическую величину, подлежащую измерению. Для измерения температур используют термодпары (типа ТХК) или термопреобразователи сопротивления (типа ТСП, ТСМ). Термодпары с термочувствительным элементом (определенной градуировки), термоэлектрические преобразователи или термоприемники (ТП) подключают к входам прибора – блока обработки данных;

- блок обработки данных может включать в себя регистрирующие или показывающие приборы, цифровые фильтры, вычислители или логические устройства, аналого-цифровые преобразователи, аналоговые модули входа, адаптеры интерфейса, а также ЭВМ;

- термоэлектродные или компенсационные провода, которые передают сигналы от термопар к прибору и изготовлены из тех же материалов (либо с аналогичными термоэлектрическими характеристиками), что и термопара.

При определении и исследовании ТФХ материалов и изделий, основными параметрами измерений являются: температура, текущее время, геометрические размеры образца и расстояние между фиксированными точками тела, где установлены датчики температур.

Любые измерительные системы не могут обеспечить определение действительного значения температуры элементарного объема исследуемого объекта, поскольку физические принципы и исходные условия проведения измерений в той или иной степени оказываются нарушенными [2, 7, 23, 36, 52, 53, 63, 85, 86, 91, 104, 111, 131, 138, 147, 175, 179, 180, 185, 201, 208, 225, 244, 255]. Результат экспериментального измерения температуры $T_э$ будет отличаться от ее действительного значения $T_д$, на величину называемую абсолютной погрешностью измерения температуры $\Delta T = T_э - T_д$.

Абсолютную погрешность измерения температуры ΔT можно разделить на три составляющие: методическую $\Delta T_м$, инструментальную $\Delta T_и$ и погрешность наблюдения $\Delta T_н$: $\Delta T = \Delta T_м + \Delta T_и + \Delta T_н$. Любая погрешность измерения может выражаться в долях действительного значения измеряемой величины и называется относительной погрешностью измерения.

Методическая погрешность измерения температуры $\Delta T_м$ возникает из-за неточности выполнения методики измерений, недостаточной изученности явлений теплообмена между исследуемым объектом и термоприемником. Методические погрешности при исследовании ТФХ материалов связанные с неточностью реализации теоретических предпосылок могут быть вызваны следующими условиями: временем наступления упорядоченного теплового режима, неоднородностью температурного поля, изменением ТФХ веществ от температуры и др.

Инструментальная (приборная) погрешность измерения температуры $\Delta T_и$ возникает из-за несовершенства средств измерения температуры и использования этих средств в условиях, отличающихся от нормальных. Приборную погрешность снижают путем применения современных контрольно-измерительных приборов и средств автоматизации, а также ЭВМ.

Погрешность регистрации наблюдения $\Delta T_н$ определяется квалификацией и особенностями наблюдателя и возникает в результате неправильного отсчета и снятия показаний, расшифровки записей и результатов регистрации. Как правило, эта составляющая погрешности при исключении ошибок экспериментатора незначительна по сравнению с $\Delta T_м$ и $\Delta T_и$.

Кроме того, погрешность ΔT разделяют на систематическую $\Delta T_{сист}$ и случайную $\Delta T_{сл}$: $\Delta T = \Delta T_{сист} + \Delta T_{сл}$.

Систематической погрешностью измерения температуры $\Delta T_{сист}$ называют составляющую погрешности измерения, которая остается постоянной или закономерно изменяется в процессе измерений (либо при их повторении). Систематическую погрешность оценивают расчетным путем или экспериментально, а затем вводят соответствующую поправку в результат измерения температуры, либо самого метода.

Случайная погрешность измерения температуры $\Delta T_{сл}$ заранее не предсказуема и изменяется случайным образом при повторных измерениях температуры теми же средствами измерения. Закономерности проявления случайной погрешности и оценка ее могут быть выявлены при многократных наблюдениях температуры с последующей статистической обработкой результатов измерений. В полученное значение случайной погрешности $\Delta T_{сл}$ войдет и та часть систематической погрешности, которая из-за сложности и приближенности оценки $\Delta T_{сист}$ не могла быть ранее учтена.

Измеряемая температура среды, веществ, материалов и изделий может быть стационарной (постоянной) или нестационарной (изменяться во времени). В зависимости от этого погрешность измерения температуры подразделяют на статическую $\Delta T_{ст}$ и динамическую $\Delta T_{дин}$. Погрешность измерения нестационарной температуры включает в себя статическую $\Delta T_{ст}$ и динамическую составляющую $\Delta T_{дин}$: $\Delta T = \Delta T_{ст} + \Delta T_{дин}$.

Погрешность измерения стационарной температуры включает в себя только статическую $\Delta T_{ст}$, а динамическая составляющая $\Delta T_{дин} = 0$.

Статическая составляющая погрешности $\Delta T_{ст}$ зависит от многих факторов: измерения температуры

твердых тел, жидкостей, газов, движущихся сред или высокоскоростных потоков, монтажа ТП на поверхности или внутри тела (материала, изделия, массива) с высокой или низкой теплопроводностью, при установке ТП в пазу, цилиндрическом канале или с использованием защитных экранов, применения непогружаемых ТП контактным или бесконтактным способом. Существенно влияют на статическую составляющую погрешности $\Delta T_{ст}$ направление теплового воздействия на исследуемый объект (нагрев или охлаждение), теплообмен между отдельными элементами ТП, теплоотдача излучением ТП и его окружением в газообразных, частично прозрачных и других объектах, влияние внутренних источников теплоты, характер изменения температуры внутри ТП и в зоне его расположения.

Для непогружаемых контактных термоприемников статическая составляющая погрешности $\Delta T_{ст}$, зависит от процесса переноса тепла через зону механического контакта двух твердых тел или деталей [53, 85, 91, 111, 131, 208, 244, 255]. На эффективность передачи тепла в зоне контакта оказывают влияние такие факторы, как физические свойства материалов, из которых выполнены термопара и исследуемый материал, свойства среды, заполняющей пространство между соприкасающимися поверхностями, чистота обработки и характер микрорельефа указанных поверхностей, сила сжатия и температура в зоне контакта. Так термическое сопротивление контакта понижается с увеличением нагрузки на соприкасающиеся поверхности, увеличением частоты обработки контактных поверхностей, повышением температуры в зоне раздела. Для непогружаемых контактных термоприемников статическая составляющая погрешности $\Delta T_{ст}$ учитывается независимо от характера теплового режима (стационарный или нестационарный).

Динамическая составляющая погрешности $\Delta T_{дин}$ вызвана скоростью изменения исследуемой величины (температуры) T_d от времени τ и невозможностью из-за инерционных свойств ТП регистрации мгновенных значений нестационарной температуры средствами измерения.

Каждый из применяемых приборов функциональной схемы комплекса вносит в результат измерения дополнительную инструментальную погрешность, зависящую от особенностей конструкции и принципа действия. Результирующая погрешность всего измерительного комплекса определяется суммой погрешностей каждого элемента, который может иметь свои погрешности. Суммирование всех составляющих погрешностей определяет методическую погрешность ΔT_m измерительного комплекса. Количественный анализ методических погрешностей в конечном итоге заключается в обосновании и выборе математической модели, определяющей процесс теплового взаимодействия объекта исследования с ТП.

Принимая меры защиты (хороший тепловой контакт термопар с телом, установка ТП в изотермической поверхности, увеличение числа измерений, применение совершенных контрольно-измерительных приборов), можно уменьшить инструментальную, случайную и статическую погрешности до необходимого минимального значения. Если это удастся сделать, то единственным фактором оказывается тепловое воздействие исследуемого объекта. Если тепловое воздействие объекта изменяется во времени (нестационарные процессы), то остается лишь одна составляющая методической погрешности, обусловленная тепловой инерционностью или динамической погрешностью ТП.

Однако внести дополнительную динамическую составляющую погрешности может и любой из перечисленных выше источников измерительного комплекса, если интенсивность его воздействия с течением времени достаточно велика. Анализ источников погрешностей [2, 53, 86, 91, 111, 132, 138, 147, 179, 180, 201, 208, 225, 244, 255] показывает, что основные погрешности измерений ТФХ материалов имеют тепловую природу, так как быстрое действие современных регистрирующих приборов (особенно электронных) исчисляется долями секунд, а процесс теплообмена между ТП и средой может занимать значительно большее время.

5.2. ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУР НА ПОВЕРХНОСТИ ТЕЛА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПАЗОВ ПРЯМОУГОЛЬНОЙ ФОРМЫ

При исследовании ТФС материалов и измерении нестационарных температур на поверхности объекта (тела) термопара чаще всего располагается в прямоугольном канале (пазу) с геометрическими размерами – глубиной h и шириной паза b . На рис. 5.2.1 показана схема расположения ТП цилиндрической формы на поверхности исследуемого материала.

При реализации такого способа измерений желательно, чтобы глубина и ширина паза не превышали 0,2...0,8 мм. Замазка выбирается с относительно высокой теплопроводностью. Чувствительный элемент по возможности чеканится к исследуемой поверхности. Паз с термопарой заполняется клеем, пастой, цементом или другим веществом с коэффициентом теплопроводности меньшим или близким к исследуемому материалу. Снижение погрешностей измерения температур таких материалов, как оргстекло, фторопласт, бетон, красный и силикатный кирпич достигалось следующими приемами:

1) термочувствительный элемент ТП должен находиться в хорошем тепловом контакте с телом, для чего крепление термопар к образцам из оргстекла проводилось опилками оргстекла, смешанными с дихлорэтаном; из фторопласта – опилками фторопласта смешанными с универсальным клеем (ТУ 6-15-1268–80); из бетона, красного и силикатного кирпича – цементом, смешанным с силикатным клеем;

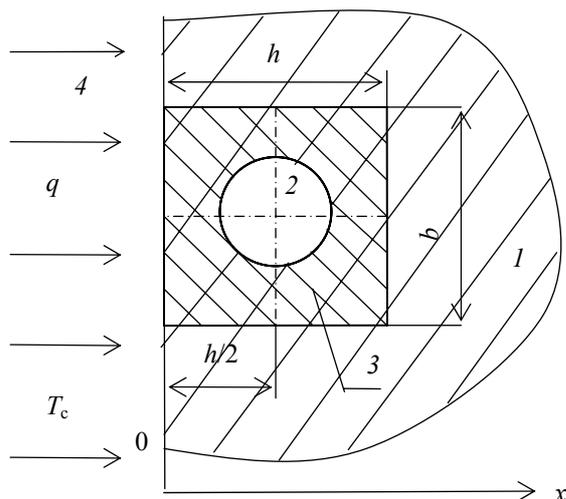


Рис. 5.2.1. Схема расположения термопары на поверхности материала:

1 – материал; 2 – термопара (ТП); 3 – замазка;

4 – окружающая среда; q – удельный тепловой поток;

b, h – геометрические размеры паза; T_c – температура окружающей среды

2) *спай термопары должен размещаться в изотермических плоскостях;*

3) *все провода термопар должны быть изолированы защитным фторопластовым кожухом (кембриком) во избежание теплоотдачи оголенного провода с окружающей средой.*

В результате такой "защиты" термопар, коэффициент теплопроводности исследуемого материала λ_1 незначительно превышает теплопроводность замазки λ_3 . Методическая погрешность измерения температуры поверхности объекта (образца) возникает ввиду разности значений теплопроводности λ_1 и λ_3 и перераспределения тепловых потоков в области паза, а также смещения термопары на величину $h/2$ от поверхности исследуемого объекта [255].

В одном из вариантов определения температуропроводности материалов образец нагревается до термодинамического состояния в установке или сушильном шкафу (разд. 3.2).

При измерении *стационарной* температуры поверхности тела и условии, что коэффициент теплоотдачи с поверхности тела в окружающую среду равен α_0 , распределение температуры по сечению ТП равномерное, а термопара занимает центральное положение внутри паза (рис. 5.2.1), погрешность ΔT_3 определяется по выражению [255]:

$$\Delta T_3 = T_3 - T_d = A (T_c - T_d) = A (T_3 - T_c) / (A - 1), \quad (5.2.1)$$

где T_3 и T_d – измеренная (экспериментальная) и действительная температура поверхности тела; T_c – температура окружающей среды.

Показатель погрешности измерения температуры поверхности A определяется из выражения

$$A \approx [1 - \varphi \xi_0 (1 + \eta)] / [1 + \mu (1 + \eta)]. \quad (5.2.2)$$

Входящие в формулу (5.2.2) параметры рассчитываются так:

$$\begin{aligned} \varphi &= 1 + h/b; \quad \mu = 1 + 2h/b; \quad \xi_0 = \alpha_0 h / \lambda_0; \quad \xi_3 = \alpha_0 h / \lambda_3; \\ \eta &= \varphi^2 \psi (1 + \mu) / \mu \xi_3 \omega; \quad \psi = [1 + \pi d / 2 (h + b)]^2; \quad \omega = 1 - \pi d^2 / 4hb; \end{aligned}$$

где λ_3 – теплопроводность замазки, d – диаметр термопары.

Так, при исследовании бетона измеренная температура его поверхности (для разных опытов) составила $T_3 = 97 \dots 100$ °С. Термопара ХК диаметром $d = 0,4 \cdot 10^{-3}$ м расположена в прямоугольном пазу $h = b = 0,8 \cdot 10^{-3}$ м. Температура окружающей среды $T_c = 110$ °С, а коэффициент теплоотдачи $\alpha_0 = 25$ Вт/(м² · К). Коэффициент теплопроводности бетона и цементной замазки, соответственно равны: $\lambda_0 = 1$ Вт/(м · К), $\lambda_3 = 0,5$ Вт/(м · К).

Предварительно находим параметры:

$$\varphi = 2; \quad \mu = 3; \quad \xi_0 = 0,02; \quad \xi_3 = 0,04; \quad \psi = 1,94; \quad \omega = 0,804; \quad \eta = 322.$$

Тогда показатель погрешности измерения температуры на поверхности тела, определяемый из выражения (5.2.2), будет равен $A = -0,012$.

Погрешность измерения температуры поверхности бетона, определяемая из выражения (5.2.1),

$$\Delta T_3 = A (T_3 - T_c) / (A - 1) = -0,12$$
 °С;

действительная температура поверхности бетона

$$T_d = T_3 - \Delta T_3 = 100,12$$
 °С;

относительная погрешность измерения

$$\Delta T = \Delta T_3 / T_d = 0,0012 = 0,12$$
 %.

При измерении *нестационарной* температуры поверхности тела, когда распределение температуры по сечению ТП равномерное, а термопара занимает центральное положение внутри паза (рис. 5.2.1), погрешность измерения включает в себя только динамическую составляющую $\Delta T_{\text{дин}}$, которая приближенно оценивается по формуле [255]:

$$\Delta T_{\text{дин}} = T_3(\tau) - T_d(\tau) = (\varepsilon_0 - \varepsilon_3) b, \quad (5.2.3)$$

где $T_3(\tau)$ и $T_d(\tau)$ – измеренная (экспериментальная) и действительная температура поверхности тела; ε_0 , ε_3 – инерционная составляющая исследуемого тела и замазки, с; b – темп нагревания тела, °С/с.

Коэффициент или показатель тепловой инерции материала (тела) определяется из выражения [255]

$$\varepsilon_m = (h + b)^2 / 8\pi^2 a_m, \quad (5.2.4)$$

где a_m – коэффициент температуропроводности материала, $\text{м}^2/\text{с}$.

Коэффициент или показатель тепловой инерции замазки определяется из выражения [255]:

$$\varepsilon_3 = \frac{4}{\lambda_3} \left[(c\rho)_3 + \frac{(c\rho)_T}{\left(\frac{4bh}{\pi d^2}\right)^{-1}} \right] \left[\frac{(bh) - \frac{\pi d^2}{4}}{2(b+h) + \pi d} \right]^2, \quad (5.2.5)$$

где λ_3 – теплопроводность замазки, $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$; d – диаметр термопары, м ; b и h – геометрические размеры паза; $(c\rho)_3$ и $(c\rho)_T$ – объемная теплоемкость замазки и термопары, $\text{кДж}/(\text{м}^3 \cdot \text{К})$.

Рассмотрим конкретные примеры нагревания в экспериментальной установке (рис. 3.1.1) образцов из оргстекла (рис. 3.3.1) и бетона (рис. 3.5.1), выполненных в виде призмы квадратного сечения со скоростью изменения температуры на поверхности исследуемого материала $b \approx 0,025 \text{ К}/\text{с}$. Термопара градуировки ХК, диаметром $d = 0,4 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ расположена в прямоугольном пазу $h = b = 0,8 \cdot 10^{-3} \text{ м}$. Коэффициент температуропроводности для оргстекла и бетона соответственно равны $a_{\text{орг}} = 0,12 \cdot 10^{-6}$ и $a_{\text{бет}} = 0,5 \cdot 10^{-6}$, $\text{м}^2/\text{с}$.

Коэффициент теплопроводности цементной замазки (для бетона) и опилок оргстекла, смешанных с дихлорэтаном (для оргстекла), соответственно равны $\lambda_{\text{ц.з}} = 0,5 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$, $\lambda_{\text{з.о}} = 0,2 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$. Объемная теплоемкость, $\text{Дж}/(\text{м}^3 \cdot \text{К})$ для цементной замазки, опилок оргстекла, и термопары ХК соответственно равны $(c\rho)_{\text{цз}} = 1,12 \cdot 10^6$, $(c\rho)_{\text{з.о}} = 1,6 \cdot 10^6$, $(c\rho)_T = 4,35 \cdot 10^6$.

Предварительно определяется коэффициент или показатель тепловой инерции материала из выражения (5.2.4):

- оргстекла

$$\varepsilon_{\text{орг}} = (h + b)^2 / 8\pi^2 a_{\text{орг}} = 0,27 \text{ с};$$

- бетона

$$\varepsilon_{\text{бет}} = (h + b)^2 / 8\pi^2 a_{\text{бет}} = 0,065 \text{ с}$$

и показатель тепловой инерции замазки из выражения (5.2.5):

- оргстекла

$$\varepsilon_{\text{з.о}} = 0,71 \text{ с};$$

- бетона

$$\varepsilon_{\text{ц.з}} = 0,23 \text{ с}.$$

Динамическая составляющая $\Delta T_{\text{дин}}$, приближенно оценивается по формуле (5.2.3) и соответственно равна:

- для оргстекла

$$\Delta T_{\text{дин}} = (\varepsilon_{\text{орг}} - \varepsilon_{\text{з.о}}) b = -0,011 \text{ К};$$

- для бетона

$$\Delta T_{\text{дин}} = (\varepsilon_{\text{бет}} - \varepsilon_{\text{ц.з}}) b = -0,004 \text{ К}.$$

При нестационарном нагревании образцов в диапазоне температур ΔT от 20 до 80 °С относительная погрешность соответственно составит:

- для оргстекла

$$\Delta \zeta = \Delta T_{\text{дин}} / \Delta T = 0,00028 = 0,028 \text{ \%};$$

- для бетона

$$\Delta\zeta = \Delta T_{\text{дин}} / \Delta T = 0,00007 = 0,007 \%$$

5.3. ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУР КОНТАКТНЫМ МЕТОДОМ

• При определении ТФХ материалов и изделий измерение температур в стационарных и нестационарных процессах нагрева или охлаждения объектов производится контактными термопарами, конструкция которых представлена в разд. 3.7. Для проведения экспериментов в методах 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. 3.7.1.

Отличительной особенностью контактных методов неразрушающего контроля ТФХ материалов и изделий является непосредственный контакт термодатчиков 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 [36, 53, 85, 86, 104, 131, 208, 244].

На рис. 5.3.1 изображена модель контактной термопары с размерами термопреобразователя (термопары) и тепловой изоляции (теплоизолятора).

Для принятой конструкции непогружаемой контактной термопары термодатчика (ТП) при известных условиях эксплуатации можно рассчитать общую погрешность контактной термопары.

Индексы 1, 2, 3 на рис. 5.3.1 соответственно относятся к термодатчику, 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 $\Delta r = r_2 - r_1 = 1,8 \text{ мм}$; а толщина изоляции в осевом направлении $\Delta = L_2 - L_1 = 4,6 \text{ мм}$.

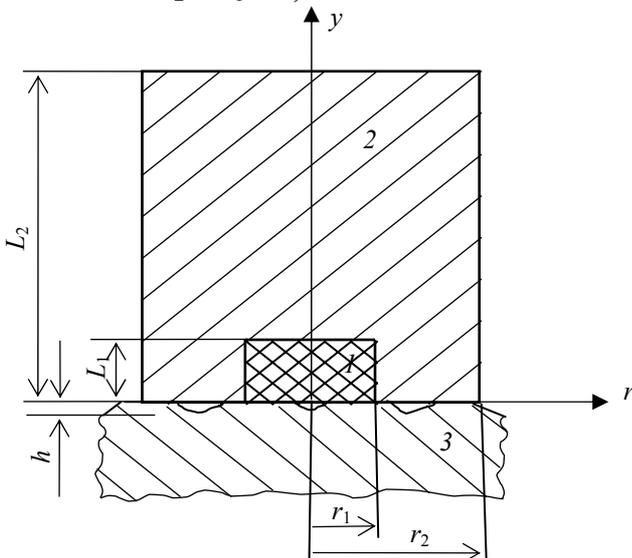


Рис. 5.3.1. Модель (сечение) контактной термопары, используемой для определения теплофизических свойств материалов:

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

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_d , а некоторую отличную от нее температуру T_3 . Одна из основных задач при контактном измерении температуры заключается в определении действительной температуры T_d по измеренной температуре T_3 , 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 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 ТП необходимо иметь относительно простые явные зависимости – симплексы [208].

Симплексы представлены системой:

$$K_a = \alpha_k / \alpha_b; \quad K_{*\lambda} = \lambda_2 / \lambda_1; \quad K_\lambda = 100 K_{*\lambda}; \quad K_c = (cp)_2 / (cp)_1;$$
$$K_{\Delta r} = \Delta r / L_1; \quad K_\Delta = \Delta / L_1, \quad (5.3.1)$$

где α_k , α_b – коэффициенты теплообмена зоны контакта и поверхности термоприемника с внешней средой (воздухом); λ_2 , λ_1 – коэффициенты теплопроводности теплоизолятора и термоприемника; $(cp)_2$, $(cp)_1$ – объемная теплоемкость теплоизолятора и термоприемника, кДж/(м³ · 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; чистота обработки и характер микро рельефа указанных поверхностей; силы сжатия и температуры в зоне контакта. Термическое сопротив-

ление контакта понижается с увеличением нагрузки на соприкасающиеся поверхности, увеличением частоты обработки контактных поверхностей, повышением температуры в зоне раздела.

Рассмотрим вопросы расчета контактной проводимости α_k при теплообмене контактного ТП с поверхностью твердого тела. Так, при контакте шероховатых поверхностей предложено определять α_k по формуле [208, 244]:

$$\alpha_k = 2\lambda_c / (h_2 + h_3) + 7 \cdot 10^3 P\lambda_m / ES_H, \quad (5.3.2)$$

где λ_c – коэффициент теплопроводности межконтактной среды (воздуха), Вт/(м · К); h_2, h_3 – средняя высота выступов микрошероховатостей соприкасающихся поверхностей, м; P – нормальная нагрузка, Н; λ_m – приведенный коэффициент теплопроводности соприкасающихся материалов; E – предел прочности или временное сопротивление разрыву менее пластичного материала, Н/м²; S_H – номинальная (геометрическая) площадь контакта, м².

Первое слагаемое выражения (5.3.2) представляет собой тепловую проводимость межконтактной среды, а второе – является тепловой проводимостью через места фактического контакта. Среднее значение температуры в зоне контакта составляет ≈ 60 С°, а коэффициент теплопроводности межконтактной среды (воздуха) $\lambda_c = 0,029$ Вт/(м · К). Нормальная нагрузка пружин (рис. 5.3.1) составляет $P = 0,1$ кг = $0,98 \approx 1$ Н.

Теплоизолятор выполнен из фторопласта со следующими параметрами и характеристиками: $h_2 = 1$ мкм = 10^{-6} м; $S_H = 4$ мм × 10 мм = $4 \cdot 10^{-6}$ м²; $\lambda_2 = 0,23$ Вт/(м · 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) имеют следующие параметры и характеристики: $h_3 \approx 100$ мкм $\approx 10^{-4}$ м; $\lambda_3 \approx 0,8$ Вт/(м · К); $E \approx 70$ кг/см² $\approx 70 \cdot 10^5$ Н/м². Приведенный коэффициент теплопроводности λ_m соприкасающихся материалов определяется по соотношению

$$\lambda_m = 2 \lambda_2 \lambda_3 / (\lambda_2 + \lambda_3) = 2 \cdot 0,23 \cdot 0,8 / (0,23 + 0,8) = 0,36 \text{ Вт/(м · К)}.$$

Контактная проводимость, вычисленная по формуле (5.3.2), составляет

$$\begin{aligned} \alpha_k &= 2 \cdot 0,029 / (1,01 \cdot 10^{-4}) + (7 \cdot 10^3) \cdot 1 \cdot 0,36 / (70 \cdot 10^5) \cdot (4 \cdot 10^{-6}) = \\ &= 580 + 90 = 670 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}. \end{aligned}$$

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 ТП проходит тепловой поток, величина и направление которого, влияет, в конечном счете, на погрешность контактной термопары. Коэффициент теплообмена поверхности контактной термопары (теплоизолятора) с внешней средой (воздухом) при естественной конвекции принимается равным $\alpha_B \approx 10$ Вт/(м² · К).

Тогда метрологические симплексы (5.3.1) 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 формуле [208]:

- 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

$$\Delta T_{ст} = (0,046 + 3,74 K_a^{-0,77}) [(1,38 - K_\lambda^{-0,38}) K_\Delta^M - 0,011 K_\lambda]. \quad (5.3.3)$$

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 (5.3.2), 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 (5.3.3) дает возможность решить и обратную задачу: на стадии проектирования контактной термопары найти требуемую толщину теплоизолятора.

Так, если задана допустимая статическая погрешность $\Delta T_{\text{ст. доп}}$, известны условия эксплуатации и выбран материал теплоизолятора, то его минимально возможную толщину определяют по соотношению [208]:

$$\delta_{\text{ст}} = L_1 \{ [(0,046 + 3,74 K_a^{-0,77})^{-1} \Delta T_{\text{ст. доп}} + 0,011 K_\lambda] (1,38 - K_\lambda^{-0,38})^{-1} \}^{1/m}.$$

Если задать допустимую статическую погрешность $\Delta T_{\text{ст. доп}} = 1 \%$, то при уже известных условиях эксплуатации и выбранном материале теплоизолятора его минимально возможная толщина составит

$$\begin{aligned} \delta_{\text{ст}} &= L_1 / [(0,046 + 0,147)^{-1} \cdot 0,01 + 0,011] (1,38 - 1)^{-1} = \\ &= 0,4 / [(0,193)^{-1} \cdot 0,01 + 0,011] (2,63) = \\ &= 0,4 / [0,063] (2,63) = 0,4 / 0,165 = 2,4 \text{ мм.} \end{aligned}$$

Если задать допустимую статическую погрешность $\Delta T_{\text{ст. доп}} = 2 \%$, то при уже известных условиях эксплуатации и выбранном материале теплоизолятора, его минимально возможная толщина составит

$$\begin{aligned} \delta_{\text{ст}} &= L_1 / [(0,046 + 0,147)^{-1} \cdot 0,02 + 0,011] (1,38 - 1)^{-1} = \\ &= 0,4 / [(0,193)^{-1} \cdot 0,02 + 0,011] (2,63) = \\ &= 0,4 / [0,115] (2,63) = 0,4/0,3 = 1,3 \text{ мм.} \end{aligned}$$

Анализ зависимости (5.3.3) позволяет оценить влияние эксплуатационных и конструктивных параметров на $\Delta T_{\text{ст}}$. Так увеличение K_a , снижение K_λ , увеличение относительной толщины изоляции K_Δ (K_Δ) 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 ТП при измерении нестационарной температуры воспользуемся соотношением [255]:

$$\Delta T_{\text{дин}} = \varepsilon_1 b, \quad (5.3.4)$$

где ε_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 ε_1 определяется из соотношения [208]:

$$\varepsilon_1 = \tau_1 (L_1)^2 / a_1, \quad (5.3.5)$$

где τ_1 – безразмерный аналог термической инерции; a_1 – коэффициент температуропроводности термоприемника (термопары ХК), м²/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 [208]:

$$\tau_1 = 10 K_c (F K_{\Delta r}^U + D K_{\lambda}^W + 13,7 K_a^{-0,5} - 3,63),$$

$$\tau_1 = 10 K_c (F K_{\Delta}^U + D K_{\lambda}^W + 13,7 K_a^{-0,5} - 3,63), \quad (5.3.6)$$

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 (5.3.6), равен:

- в радиальном направлении

$$\begin{aligned} \tau_1 &= 10 K_c (F K_{\Delta r}^U + D K_{\lambda}^W + 13,7 K_a^{-0,5} - 3,63) = \\ &= 4 \cdot (1,91 \cdot 4,5^{1,76} + 4,42 \cdot 1^{-0,6} + 13,7 \cdot 67^{-0,5} - 3,63) = \\ &= 4 \cdot (26,96 + 4,42 + 1,67 - 3,63) = 4 \cdot 29,4 = 118; \end{aligned}$$

- в осевом направлении

$$\begin{aligned} \tau_1 &= 10 K_c (F K_{\Delta}^U + D K_{\lambda}^W + 13,7 K_a^{-0,5} - 3,63) = \\ &= 4 \cdot (1,91 \cdot 11,5^{1,76} + 4,7 \cdot 1^{-0,6} + 13,7 \cdot 67^{-0,5} - 3,63) = \\ &= 4 \cdot 143 = 572. \end{aligned}$$

Показатель тепловой инерции контактной термопары ε_1 , определяемый по соотношению (5.3.5), 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 (5.3.4) 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 τ_1 , ε_1 , $\Delta T_{\text{дин}}$, вычисленные по соотношениям (5.3.4) – (5.3.6), 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 термомпарами обычно относят к диапазону (рис. 3.7.2, 3.7.3) контролируемых температур $\Delta T_k = T_{k, \text{max}} - T_{k, \text{min}} = 60 - 20 = 40 \text{ }^\circ\text{C}$, очевидно, что относительная максимальная погрешность динамической составляющей $\Delta T_{\text{дин}}^*$ определится из соотношения $\Delta T_{\text{дин}}^* = \Delta T_{\text{дин. max}} / \Delta T_k = 1,03 / 40 = 0,025 = 2,5 \%$.

Выражения (5.3.4) – (5.3.6) дают возможность решить и обратную задачу – на стадии проектирования контактной термомпары 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 [208]:

$$\delta_{\text{дин}} = L_1 [(0,1 \tau_{1\text{доп}} K_c^{-1} - D K_{\lambda}^W - 13,7 K_a^{-0,5} + 3,63) F^{-1}]^{1/U}. \quad (5.3.7)$$

Так, если задать допустимую динамическую погрешность $\Delta T_{\text{дин. доп}} = 1 \text{ К}$, то при уже известных условиях эксплуатации, выбранном материале теплоизолятора, скорости изменения температуры в области упорядоченного теплового режима $b \approx 0,025 \text{ К/с}$ показатель тепловой инерции контактной термомпары $\varepsilon_{1\text{доп}} = \Delta T_{\text{дин. доп}} / b = 1 / 0,025 = 40 \text{ с}$.

Безразмерный аналог термической инерции контактной термомпары

$$\tau_{1\text{доп}} = \varepsilon_{1\text{доп}} a_1 / (L_1)^2 = 40 \cdot 5,3 \cdot 10^{-6} / (0,4)^2 \cdot 10^{-6} = 1325.$$

Минимально возможная толщина теплоизолятора контактной термомпары, определяемая по соотношению (5.3.7), составит

$$\begin{aligned} \delta_{\text{дин}} &= L_1 [(0,1 \tau_{1\text{доп}} K_c^{-1} - D K_{\lambda}^W - 13,7 K_a^{-0,5} + 3,63) F^{-1}]^{1/U} = \\ &= 0,4 [(0,1 \cdot 1325 \cdot 0,4^{-1} - 4,42 \cdot 1^{-0,215} - 13,7 \cdot 67^{-0,5} + 3,63) \cdot 1,91^{-1}]^{1/1,76} = \\ &= 0,4 [(331 - 4,42 - 1,67 + 3,63) \cdot 0,52]^{0,57} = 0,4 [(328) \cdot 0,52]^{0,57} = \\ &= 0,4 [170,6]^{0,57} = 0,4 \cdot 18,72 = 7,5 \text{ мм}. \end{aligned}$$

Анализ зависимостей (5.3.4) – (5.3.6) 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_{λ} увеличивает безразмерный аналог термической инерции контактной термопары τ_1 в 3 раза, а такое же возрастание K_{Δ} приводит к росту τ_1 в 10 раз [208]. Влияние на динамические свойства контактной термопары изменения симплекса K_{α} ощутимо проявляется только при неэффективной изоляции ТП от внешней среды и наиболее значительно для малых значений K_{α} . Так, уменьшение K_{α} 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_{α} 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 ТП на материал, подобрать соответствующий вторичный прибор. По быстродействию вторичные приборы существенно превосходят ТП и динамические свойства всего измерительного комплекта можно характеризовать показателем термической инерции термоприемника.

Предельная погрешность измерения температуры всего измерительного комплекта определяется из соотношения

$$\Delta T_{\text{к}} = [(\Delta T_{\text{дин}}^*)^2 + (\Delta T_{\text{пр}})^2 \pm (\Delta T_{\text{ст}})^2]^{0,5}, \quad (5.3.8)$$

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 (5.3.8) $\Delta T_{\text{ст}}$ 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 (5.3.8):

- при нагревании

$$\begin{aligned} \Delta T_{\text{к}} &= [(\Delta T_{\text{дин}}^*)^2 + (\Delta T_{\text{пр}})^2 + (\Delta T_{\text{ст}})^2]^{0,5} = \\ &= [(0,025)^2 + (0,005)^2 + (0,014)^2]^{0,5} = \\ &= [(0,000625) + (0,000025) + (0,000196)]^{0,5} = \\ &= [0,000846]^{0,5} = 0,029 = 2,9 \%; \end{aligned}$$

- при охлаждении

$$\begin{aligned} \Delta T_{\text{к}} &= [(\Delta T_{\text{дин}}^*)^2 + (\Delta T_{\text{пр}})^2 - (\Delta T_{\text{ст}})^2]^{0,5} = \\ &= [(0,025)^2 + (0,005)^2 - (0,014)^2]^{0,5} = \\ &= [(0,000625) + (0,000025) - (0,000196)]^{0,5} = \\ &= [0,000454]^{0,5} = 0,021 = 2,1 \%. \end{aligned}$$

Для того, чтобы свести к минимуму влияние погрешности вторичного прибора на результат измерения, достаточно выбрать автоматический прибор определенной градуировки, удовлетворяющей условию $\Delta T_{\text{пр}} \leq 0,2 \Delta T_{\text{к. доп}}$.

5.4. ПОГРЕШНОСТЬ И ДОСТОВЕРНОСТЬ ИЗМЕРЕНИЙ

ТФС МАТЕРИАЛОВ

Основные погрешности, возникающие при экспериментальном определении коэффициента температуропроводности материалов абсолютным методом, объемной теплоемкости и теплопроводности, определяемым из того же опыта, рассмотрены выше.

Оценка погрешности, достоверности, степени точности проводилась для полученных теоретических закономерностей и формул, а также результатов экспериментального определения коэффициента температуропроводности, теплопроводности и объемной теплоемкости материалов.

Суммарная погрешность определения теплофизических характеристик и 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 [186]:

$$a = a^* \left(1 + \sum_i \varphi_i \right) \pm \xi_a, \quad (5.4.1)$$

где a^* – коэффициент температуропроводности определяемый на образце, выполненном в виде призмы квадратного сечения

$$a^* = \frac{\Delta\Phi}{\Delta\tau} \frac{R^2}{4,94} = A \frac{R^2}{4,94}, \quad (5.4.2)$$

φ_i – поправка (противоположная погрешности по знаку), отражающая влияние i -го фактора, не учитываемого теорией; ξ_a – относительная погрешность измерений.

Погрешности, связанные с неточностью реализации теоретических предпосылок, вызваны следующими условиями, которые рассмотрим ниже.

1. *Временем 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. 2.5), 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. *Неоднородностью 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 высокой 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 градуса, что соответствует погрешности прибора (измерителя температур ТРМ 138 или потенциометра КСП-4). Следовательно, поправка, связанная с неоднородностью температурного поля $\varphi_2 = 0,005$.

3. Неточностью 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 [225]. 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. 5.3).

Следовательно, поправка $\varphi_3 = 0,01$, при установке термопары в пазу и $\varphi_3 = 0,029$ при использовании контактных термопар.

4. Изменением расстояния между термодатчиками.

Как правило, при нагревании материала ввиду линейного расширения происходит смещение термопары или термодатчика. Поправка определится из выражения [186]: $\varphi_4 = 2 \delta_l T$, где δ_l – коэффициент линейного расширения материала; T – температура образца. При нагревании образца из оргстекла до температуры $T \approx 100$ °С: $\delta_l = 7,8 \cdot 10^{-6}$, К⁻¹.

Следовательно, поправка, связанная с изменением расстояния между термодатчиками, при измерении температуры образца $\varphi_4 = 0,0008$.

5. Изменением 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 $\vartheta = T_{\text{ребра}} - T_{\text{гр}}$, если только в него не попадают точки фазовых переходов, теплофизические коэффициенты образцов всегда могут быть представлены с любой заданной точностью соотношениями вида

$$a = a_0(1 + \kappa_a \vartheta + n_a \vartheta^2 + \dots). \quad (5.4.3)$$

Слагаемые выражения (5.4.3) представляют собой разложения ряда Тейлора функций $a(T)$ на участках изменения перепада температур ϑ в окрестности базовой температуры T_0 (τ).

Относительные температурные коэффициенты κ_a и n_a в выражении (5.4.3) зависят от температуры T_0 (τ), остаются постоянными в пределах перепада ϑ и могут определяться в точке T_0 (τ) по значению соответствующему производной для функции $a(T)$:

$$\kappa_a = \frac{1}{a} \frac{da_0}{dt}; \quad n_a = \frac{1}{2a_0} \frac{d^2a_0}{dt^2}. \quad (5.4.4)$$

В качестве базовой точки с температурой T_0 (τ) целесообразно выбрать точку на середине грани призмы квадратного сечения. Тогда, в соответствии с обозначением ϑ , имеем $T_{\text{ребра}} = T_{\text{грани}} - \vartheta$.

Степенные ряды в разложениях (5.4.3) по физическому смыслу являются абсолютно сходящимися. Быстрота сходимости их непосредственно связана с величиной перепада ϑ в образце и может выбираться по желанию экспериментатора.

В промежуточных между фазами переходах обычно

$$|\kappa_a| \leq 3 \cdot 10^{-3} \text{ град}^{-1} \quad \text{и} \quad |n_a| \leq 3 \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-2},$$

поэтому условия оптимальной сходимости разложений (5.4.3)

$$|\kappa_a \vartheta| \leq 0,1 \quad \text{и} \quad |n_a \vartheta| \leq 0,01$$

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

$$\kappa_a = \frac{1}{12 \cdot 10^{-8}} \frac{1 \cdot 10^{-8}}{60} = 1,39 \cdot 10^{-3} \text{град}^{-1}.$$

Перепад температуры в образце $\vartheta = T_{\text{границы}} - T_{\text{ребра}} = 14$ град, а погрешность измерения коэффициента температуропроводности составит

$$\varphi_5 = \kappa_a \vartheta = 1,39 \cdot 10^{-3} \cdot 14 = 1,95 \cdot 10^{-2}.$$

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 ϑ в образцах значительно меньше, а поэтому и погрешность согласно формуле (5.4.3) будет менее 1,95 %.

Таким образом, суммарная поправка, отражающая влияние каждого фактора, связанного с неточностью реализации теоретических предпосылок в уравнении (5.4.1), будет равна:

- при установке термопары в пазу

$$\begin{aligned} \sum_i \varphi_i &= \varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3 + \varphi_4 + \varphi_5 = \\ &= 0,01 + 0,005 + 0,01 + 0,0008 + 0,0195 = 0,0453; \end{aligned}$$

- при использовании контактных термопар

$$\begin{aligned} \sum_i \varphi_i &= \varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3 + \varphi_4 + \varphi_5 = \\ &= 0,01 + 0,005 + 0,029 + 0,0008 + 0,0195 = 0,0643. \end{aligned}$$

Относительная погрешность – ξ_a при определении коэффициента температуропроводности находится по соотношениям [75, 142]:

$$\xi_a = \frac{\Delta a}{a} = \sqrt{\frac{\Delta A^2}{A^2} + 2 \frac{\Delta R^2}{R^2}}, \quad (5.4.5)$$

где Δ – 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 $A = \Delta\Phi / \Delta\tau$ во всех четырех опытах имели следующие значения:

$$\begin{aligned} A_1 &= 29,09 \cdot 10^{-5}; & A_2 &= 31,16 \cdot 10^{-5}; \\ A_3 &= 30,12 \cdot 10^{-5}; & A_4 &= 29,01 \cdot 10^{-5}, \text{ с}^{-1}, \end{aligned}$$

а среднее арифметическое значение угловых коэффициентов A составляет

$$A_{\text{ср}} = 29,85 \cdot 10^{-5}, \text{ с}^{-1}.$$

Максимальное отклонение одного из четырех повторений опыта от среднего значения

$$\Delta A = 1,31 \cdot 10^{-5}, \text{ с}^{-1}.$$

Тогда относительная погрешность

$$\begin{aligned} \xi_a &= \frac{\Delta a}{a} = \sqrt{\frac{\Delta A^2}{A^2} + 2 \frac{\Delta R^2}{R^2}} = \\ &= \sqrt{\left(\frac{1,31}{29,85}\right)^2 + 2 \left(\frac{0,2}{45}\right)^2} = 0,044. \end{aligned}$$

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 [88].

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

$$\begin{aligned} \Delta S_{\bar{a}} &= \sqrt{\frac{\sum (\Delta a_i)^2}{n(n-1)}} = \\ &= \sqrt{\frac{[0,3^2 + (-0,5)^2 + (-0,1)^2 + 0,3^2] \cdot (10^{-8})^2}{4(4-1)}} = \\ &= \sqrt{\frac{0,44 \cdot (10^{-8})^2}{12}} = 0,191 \cdot 10^{-8}. \end{aligned}$$

3. Задаваясь границами доверительного интервала (погрешности результата измерений) $\Delta a = \pm 0,6 \cdot 10^{-8}$, определяется коэффициент Стьюдента из выражения

$$t_a = \frac{\Delta a}{\Delta S_{\bar{a}}}; \quad t_a = \frac{0,6 \cdot 10^{-8}}{0,191 \cdot 10^{-8}} = 3,14.$$

4. Пользуясь таблицами коэффициентов Стьюдента [88], находится значение надежности $\kappa_n = 0,95$. При уменьшении числа опытов до трех, при определении ТФС материалов, значение надежности снизится до $\kappa_n = 0,92$.

5.5. МЕТРОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И ПОГРЕШНОСТИ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЯ ТФС МАТЕРИАЛОВ

Для определения и исследования ТФХ веществ, материалов и изделий, может быть использован современный измерительный комплекс ОВЕН [103].

Обобщенная или функциональная схема ОВЕН включает следующие элементы: измеритель ТРМ 138, с датчиками разного типа; блок обработки данных с логическими и выходными устройствами; интерфейс связи RS-485 с адаптером интерфейса АС 3 [103].

Структурную схему для определения и исследования теплофизических свойств веществ, материалов и изделий можно представить в виде последовательного соединения нескольких элементов – звеньев (рис. 5.5.1).

Универсальный восьмиканальный измеритель-регулятор ТРМ 138 предназначен для измерения, регистрации и регулирования температуры, а также регистрации измеренных параметров на ЭВМ [103]. ТРМ 138 имеет восемь входов, к которым могут быть подключены датчики разного типа и любой конфигурации, что позволяет одновременно измерять и контролировать несколько различных величин. Для измерения

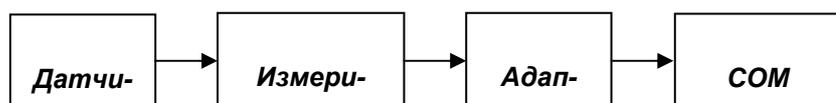


Рис. 5.5.1. Структурная схема средств ОВЕН

для измерения ТФХ материалов

температуры по входам подключены датчики температур – термопары ТХК или термопреобразователи сопротивления. Универсальный измеритель ТРМ 138 с термопарами ТХК(L) имеет диапазон измерений $-50...+750$ °С разрешающую способность $0,1$ °С, предел основной приведенной погрешности $0,25$ %.

Блок обработки данных предназначен для обработки входных сигналов, цифровой фильтрации, коррекции, масштабирования, вычисления дополнительных математических величин, индикации измерительных параметров и формирования управляющих сигналов. Вычисленное или измеренное значение температуры подается на входы логических устройств (ЛУ) для дальнейшей обработки и выдачи управляющих сигналов.

Логические устройства (ЛУ) регистрируют и выдают аналоговый сигнал в диапазоне $4...20$ мА, пропорциональный значению измеряемого параметра. Блок обработки данных ТРМ 138 включает в себя восемь ЛУ. К каждому ЛУ может быть подключено одно из восьми выходных устройств, порядковый номер которого задается при программировании.

В приборе ТРМ 138 могут быть установлены в любой комбинации следующие выходные устройства (ВУ): ЦАП "параметр – ток $4...20$ мА"; транзисторные оптопары 200 мА 40 В; семисторные оптопары 50 мА 300 В.

Интерфейс связи с ЭВМ предназначен для передачи данных и информации от прибора ТРМ 138 на компьютер, а также приема данных от компьютера к другим приборам, оснащенным таким же интерфейсом связи. В нашем случае прибор имеет встроенный двунаправленный интерфейс RS-485. Через этот интерфейс прибор может передавать текущее значение измеренных температур и состояния входных устройств.

Адаптер интерфейса АС 3 предназначен для взаимного преобразования сигналов интерфейса RS-485 и подключения до 32 многоканальных приборов ТРМ 138, ТРМ 101, СИ 8, ПКП 1.

Супервизорный контроль и сбор данных для определения теплофизических свойств веществ, материалов и изделий (температуропроводности, теплоемкости, теплопроводности) производится системой SCADA (Supervisory, Control and Data Acquisition). SCADA – система OWEN PROCESS MANAGER (OPM) – программное обеспечение, предназначенное для осуществления связи ПК (ЭВМ) с приборами ОВЕН, подключенными с помощью преобразователя интерфейса RS-485 ОВЕН АС 3 [103].

Система OPM используется для создания схемы технологических процессов на мониторе ПК и сохранения этой схемы на диске для последующего использования. Процесс сбора данных предусматривает опрос всех приборов с периодичностью, отдельно задаваемой для каждого прибора, отображение результатов этого опроса, а также сохранение указанных пользователем значений в файлы протокола.

OPM предоставляет следующие возможности:

- регистрация на ПК через заданные промежутки времени данных с выбранных пользователем каналов приборов;
- отображение текущих показаний приборов в цифровом или графическом виде на экране ПК;
- возможность просмотра архива измерений за любой промежуток времени в табличном и графическом виде с помощью подсистемы OWEN REPORT VIEWER (ORV).

Организация интерфейса связи приборов с ПК проходит в следующей последовательности. При запуске OPM тестирует рабочий компьютер и автоматически определяет свободные СОМ-порты, к которым через адаптер интерфейса могут быть подключены приборы ОВЕН. Информация о СОМ-портах выводится на экран ПК в главном окне программы. Выбор адаптера интерфейса зависит от типа интерфейса подключаемых приборов. К одному СОМ-порту возможно подключить только один адаптер интерфейса. При необходимости увеличить количество отображаемых каналов на ПК необходимо установить дополнительные СОМ-порты. Максимальное количество СОМ-портов определяется характеристиками ПК.

Для подключения приборов с интерфейсом RS-485 используется преобразователь RS-485 АС 3. Без использования средств усиления сигнала преобразователя АС 3 к нему можно подсоединять до 32 приборов, с использованием усилителя – максимальное количество каналов отображения для одного порта составляет 256.

РАБОТА С ПРОГРАММОЙ SCADA [103]

Настройка программы. При запуске OPM на экране появляется главное окно программы, в котором пользователь создает схему технологического процесса. Окно содержит панель управления и меню. При нажатой правой кнопки мыши всплывает меню настройки, в котором необходимо задать:

- тип подключаемого адаптера интерфейса (добавить интерфейс);
- подключаемые к адаптеру интерфейса приборы ОВЕН;
- параметры опроса приборов компьютера (добавить прибор/ параметры опроса/ частота опроса).

Для приборов, подключаемых с помощью преобразователя интерфейса АС 3, необходимо указать сетевой адрес подключенного прибора ОВЕН, который предварительно вводится в прибор при его программировании.

При задании параметров опроса возможно либо задать частоту опроса прибора, либо задать постоянный опрос. В случае постоянного опроса прибор опрашивается с максимально возможной для данной системы "компьютер–интерфейс–приборы" частотой. Эта частота опроса зависит от мощности компьютера, количества приборов в сети, наличия помех в линиях и т.п.

После записи конфигурации в файл необходимо запустить процесс, что возможно сделать либо из меню программы, либо кнопкой ► на панели инструментов. На экране главного окна будут отображаться все текущие значения измеряемых величин. Процесс, запущенный на исполнение, может быть в

любой момент завершен или временно приостановлен. Изменения в схему процесса можно вносить только после его завершения. Измененную схему процесса можно сохранить под прежним или новым именем.

Архивация и регистрация данных. Система ОРМ позволяет архивировать данные только тех каналов подключенных приборов, которые указаны пользователем. Для этого в пяти дополнительных окнах программы создаются ссылки на выбранные каналы. Выбор одного из пяти окон осуществляется кнопками 1 – 5 на панели инструментов. Значения, регистрируемые по заданным ссылкам, заносятся в файл архив. Частота архивации данных определяется пользователем для каждой ссылки отдельно.

На рис. 5.5.2 показаны образцы материалов, выполненные в виде призмы квадратного сечения, куба, шара, стержня, а также просмотр файла на ЭВМ при определении температуропроводности красного кирпича в графическом виде.

Просмотр файла архива осуществляется с помощью программы OWEN Report Viewer (ORV). Программа ORV позволяет открывать и просматривать файлы архива в табличном или графическом виде, а также конфигурировать отображение архивных данных для данного процесса.

Пользователь может самостоятельно определять, какие из происшедших событий, зафиксированных в архивном файле, следует включать в отображаемые таблицы и графики. Можно также ограничивать временные рамки отображаемых событий с тем, чтобы более подробно рассматривать отдельные эпизоды технологического процесса. Для последующей работы, вычисления ТФХ материалов и обработки данных из архива, желательно их сохранение в форматах Access, FoxPro, Dbase или Excel.



Рис. 5.5.2. Просмотр файла на ЭВМ при определении температуропроводности красного кирпича в графическом виде программы Excel

5.6. ПОГРЕШНОСТЬ ТЕРМОПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ТЕПЛОМЕРА

Измерители плотности тепловых потоков (в дальнейшем тепломеры) предназначены для работы в стационарных и полевых условиях и обеспечивают достаточную точность измерений. Приборы состоят из трех основных блоков – термопреобразователя, корпуса и индикаторного блока. Более простые тепломеры, которые подключаются к переносному потенциометру (типа ПП-63), имеют только термопреобразователь и корпус, и имеют одно важное преимущество перед тепломером с индикаторным блоком – малая инерционность, когда время выхода на рабочий режим составляет секунды.

Корпус тепломера выполнен из дерева в виде бруса $330 \times 75 \times 54$ мм. На одной торцевой поверхности корпуса закреплен термопреобразователь, а на другой имеется заглабление, в котором установлена термопара, измеряющая температуру окружающего наружного воздуха. Эта торцевая поверхность закрыта крышкой из пластика с отверстием в центре диаметром 14 мм для доступа воздуха. Вся дифференциальная термопара уложена внутри деревянного корпуса для предотвращения воздействия внешних магнитных полей, а ее концы выведены к потенциометру или индикаторному блоку, закрепленному также к корпусу прибора.

Термопреобразователь – это термочувствительный элемент (датчик) измерителя удельных тепловых потоков. Термопреобразователь представляет собой датчик, состоящий из двух одинаковых алюминиевых пластин с размерами $54 \times 35 \times 8$ мм, прилегающих друг к другу торцевыми поверхностями зазором 2 мм. В каждой алюминиевой пластине смонтирована одна термопара градуировки ХК, выполненная из проволоки диаметром 0,5 мм. Термопреобразователь закрепляется к корпусу прибора винтами.

При контакте с источником измерения, со стороны нагретой среды, к одной торцевой поверхности термопреобразователя подводится теплота Q_1 – за счет теплопроводности самой пластины. Одновременно по стержню термопреобразователя отводится теплота Q_2 – за счет теплопроводности пластины, Q_3 – за счет конвекции в окружающую среду с боковой поверхности стержня, а также Q_4 – за счет конвекции в окружающую среду с другой торцевой поверхности термопреобразователя.

Температура термопреобразователя T изменяется только по его длине l равной δ и зависит от коэффициента теплопроводности пластины λ , площади поперечного сечения термопреобразователя f , площади наружной поверхности F или периметра u , а также от температуры греющей среды T_c и окружающей среды T_j . Суммарный коэффициент теплоотдачи с боковой и торцевой поверхностей термопреобразователя равен α .

Эти заключения позволяют составить уравнение теплового баланса термопреобразователя: $Q_1 = Q_2 + Q_3 + Q_4$.

Используя законы конвективного и лучистого теплообмена, теплопроводности Фурье и уравнение теплового баланса рассчитывается погрешность измерения температуры и количества тепла, проходящего через термопреобразователь. Для стержня конечной длины температура на конце T_k может быть найдена из уравнения [133, 140]:

$$\frac{t_k - t_j}{t_c - t_j} = \frac{2}{e^{ml} + e^{-ml} + \frac{\alpha}{m\lambda} (e^{ml} - e^{-ml})}, \quad (5.6.1)$$

где $m = \sqrt{\frac{\alpha u}{\lambda f}}$.

Количество тепла, переданное через стержень в окружающую среду, равно количеству тепла, проходящего через основание термопреобразователя, и определяется по формуле [140]:

$$Q = \lambda m f (t_c - t_{\text{ж}}) \frac{\frac{\alpha}{m\lambda} + \frac{e^{ml} - e^{-ml}}{e^{ml} + e^{-ml}}}{1 + \frac{\alpha}{m\lambda} \left(\frac{e^{ml} - e^{-ml}}{e^{ml} + e^{-ml}} \right)}. \quad (5.6.2)$$

Расчетные формулы (5.6.1) – (5.6.2) позволяют вычислить погрешность измерения или относительную погрешность термопреобразователя.

Рассмотрим отдельный конкретный пример.

Термопреобразователь состоит из алюминиевой пластины с размерами $54 \times 35 \times 8$ мм и коэффициентом теплопроводности $\lambda = 204 \text{ Вт/м} \cdot \text{°С}$.

Соответственно площадь поперечного сечения равна $f = 0,00189 \text{ м}^2$, периметр сечения $u = 0,178 \text{ м}$, а длина стержня $l = \delta = 0,008 \text{ м}$. Температура греющей среды $T_c = 100 \text{ °С}$, а окружающей среды $T_{\text{ж}} = 20 \text{ °С}$.

Суммарный коэффициент теплоотдачи от термопреобразователя в окружающую среду составляет $\alpha \approx 10 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{°С}$.

Если правую часть уравнения (5.6.1) обозначить через H , то температура на конце термопреобразователя $T_{\text{к}}$ может быть найдена из соотношения

$$T_{\text{к}} = HT_c + (1 - H) T_{\text{ж}}$$

и для принятых условий $T_{\text{к}} = 99,91 \text{ °С}$.

Следовательно, погрешность измерения температуры термопреобразователя не превышает 0,1 %. Если термопреобразователь изготовить из меди, то погрешность измерения температуры будет меньше.

Количество тепла Q , проходящего через основание термопреобразователя, определяется по формуле (5.6.2) и составляет 2,64 Вт.

В практических условиях температура торцевой поверхности, соприкасающаяся с источником измерения, будет несколько ниже за счет термического сопротивления контакта. Если предположить, что температура торцевой поверхности термопреобразователя будет на 2,4 °С ниже теоретической, то количество тепла, проходящего через основание термопреобразователя, также определяется по формуле (5.6.2) и будет составлять 2,72 Вт. Погрешность измерения тепла ΔQ составит 0,08 Вт, а относительная погрешность измерения составит 2,9 %.

Для снижения ошибки при измерении удельных тепловых потоков при помощи термопреобразователя необходимо:

- установить в термопреобразователе две пластинки с дифференциальной термопарой;
- термопреобразователь изготавливать из материала с возможно большим коэффициентом теплопроводности;
- торцевая поверхность соприкосновения термопреобразователя и поверхность источника измерения должны иметь возможно меньшую шероховатость;
- использовать термопарный провод с меньшим диаметром и возможно плотнее прижимать термопреобразователь к источнику измерения.

5.7. ВЫВОДЫ

Дана оценка погрешности составляющих общей погрешности измерения ТФХ достоверности (статистической и динамической, систематической и случайной, методической и инструментальной и т.д.), а также достоверности получаемых результатов при экспериментальном определении коэффициента температуропроводности материалов абсолютным методом, а также объемной теплоемкости и теплопроводности, определяемым из того же опыта. Оценка погрешности, надежности и достоверности результатов измерения ТФХ, проводилась для полученных теоретических закономерностей и формул, а также результатов экспериментального определения коэффициента температуропроводности, теплопроводности и объемной теплоемкости материалов.

Суммарная погрешность определения коэффициента температуропроводности, определяемого абсолютным методом, основанным на измерении температур на поверхности призм квадратного сечения, не превышает 4,4 %.

При использовании контактных термопар, суммарная погрешность измерения коэффициента температуропроводности методом упорядоченного теплового режима в призме квадратного сечения не превышает 6,5 %.

Надежность метода неразрушающего контроля составляет 0,92...0,95.

Погрешность измерения температуры термопреобразователя не превышает 0,1 %.

Погрешность измерения теплового потока, измеряемого тепломером не превышает 2,9 %.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. Разработан перспективный абсолютный метод определения коэффициента температуропроводности материалов, основанный на измерении двух температур на поверхности призмы квадратного сечения – на ребре и середине грани. Постановка опытов не требует измерений таких физических величин, как температура окружающей среды, коэффициент теплообмена, степень черноты, тепловой поток. Нет необходимости в создании чисто конвективной или чисто лучистой окружающей среды, что значительно упрощает экспериментальные установки для исследования и определения коэффициента температуропроводности материалов.

Для экспериментального определения коэффициента температуропроводности материалов, возможен один из нескольких любых вариантов: нагревание образца в предварительно прогретой экспериментальной установке или одновременно вместе с ней, охлаждение образца на воздухе, нагрев охлажденного образца на воздухе.

Причем для определения коэффициента температуропроводности вещества и любого материала возможно два варианта расчета: путем графического построения температур ребра и середины грани призмы квадратного сечения, расчета температурного комплекса Φ и определения углового коэффициента его прямого участка; либо путем использования программы Excel и абсолютной оценки начала регулярной части упорядоченного теплового режима. Полученные в результате экспериментов коэффициенты температуропроводности оргстекла, фторопласта, бетона, строительных и теплоизоляционных материалов согласуются с опубликованными в справочной и технической литературе данными и подтверждают точность метода, для определения коэффициента температуропроводности, по температурным измерениям на поверхности образца.

2. Для проведения опытов и для измерения температуры ребра и середины грани на призме квадратного сечения, возможно использование разработанного устройства с использованием контактных термопар. Проведенные эксперименты, методом неразрушающего теплового контроля, подтверждают достаточную точность полученных коэффициентов температуропроводности различных материалов. Все графические построения не представляют сложности и легко выполняются в программе Excel или других аналогичных программах ЭВМ. Предлагаемая методика выгодно отличается от известных методов быстродействием, небольшой погрешностью, обладают новизной и оригинальностью. Кроме того, методика позволяет легко автоматизировать теплофизический эксперимент, упрощается реализация на базе микропроцессорной техники, и поэтому является перспективными для использования в информационно-измерительных системах неразрушающего контроля ТФХ материалов, в строительной теплотехнике и различных отраслях народного хозяйства.

3. Впервые разработана методика, позволяющая установить начало наступления упорядоченной части теплового периода в телах различной формы (призма, куб, стержень, шар, пластина), а в призме квадратного сечения – по тепловым измерениям на поверхности.

4. Разработаны научно-методологические основы комплексного определения коэффициентов теплопроводности, теплопроводности и объемной теплоемкости материалов по температурным измерениям на поверхности призмы квадратного сечения. Большим преимуществом разработанного способа неразрушающего контроля для комплексного определения ТФХ материалов, по сравнению с известными является:

- 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 измерения.

5. Разработан математический и графический метод определения плотности теплового потока на поверхности материалов и изделий. Представлены графики для определения плотности теплового потока

q , Вт/м², от наружных поверхностей материала, образца, изделия, ограждения зданий и сооружений к воздуху, от воздуха к материалу, образцу, изделию, а также для экспериментальной установки, в зависимости от температурного напора.

Разработаны научно-методологические основы для определения ТФХ ограждающих конструкций зданий и сооружений методом неразрушающего контроля с использованием тепломера.

6. Дана оценка погрешности, надежности и степени точности при экспериментальном определении коэффициента теплопроводности материалов абсолютным методом, объемной теплоемкости и теплопроводности, определяемым из того же опыта. Оценка погрешности, надежности, степени точности, проводилась для полученных теоретических закономерностей и формул, а также результатов экспериментального определения коэффициента теплопроводности, теплопроводности и объемной теплоемкости материалов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Азизов А.М.** Информационные системы контроля параметров технологических процессов. Л.: Химия, 1983. 328 с.
2. **Азизов А.М., Гордов А.Н.** Точность измерительных преобразователей. Л.: Энергия, 1975. 256 с.
3. **Азимов Р.К.** Измерительные преобразователи с тепловыми распределенными параметрами. М.: Энергия, 1977. 80 с.
4. **Александровский С.В.** Прикладные методы теории теплопроводности и влагопроводности бетона. М.: Компания спутник, 2001. 186 с.
5. **Алиев М.И., Гусейнов Р.Э., Араслян Д.Г.** Прибор для измерения температуропроводности твердых тел методом светового импульса // Изв. АН Аз. ССР. Серия физико-технических и математических наук. 1979. № 3. С.77.
6. **Аметистов Е.В.** Основы теории теплообмена. М.: Изд. МЭИ, 2000. 242 с.
7. **Андреев А.А.** Автоматические показывающие, самопишущие и регулирующие приборы. Л., Машиностроение, 1973. 286 с.
8. **Афанасьев В.Н., Тартаковский Д.Ф.** Имитационная модель датчика температуры для измерительных информационных систем // Теоретические и прикладные исследования в области систем измерений. Львов: Виша школа, 1987. С. 81 – 85.
9. **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; Оpubл. 23.05.89, Бюл. № 19. 6 с.
10. **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; Оpubл. 1.12.87. 8 с.
11. **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; Оpubл. 29.02.88, Бюл. № 8. 6 с.
12. **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; Оpubл. 15.06.88, Бюл. № 22. 12 с.
13. **Бабенко Ю.И.** Определение переменного коэффициента температуропроводности // ИФЖ. 1975. Т. 29, № 2. С. 341 – 344.
14. **Банников А.И., Наумов Ю.Н., Мацык С.В.** Трехканальный корректор динамической погрешности термодинамики // Измерительная техника. 1978. № 12. С. 47 – 48.
15. **Баранов В.М., Кудрявцев Е.М., Самохвалов А.И.** Ультразвуковой метод определения температуропроводности материалов // ИФЖ. 1976. Т. 30, № 6. С. 965.
16. **Баталов В.С.** Одновременное определение теплофизических параметров твердофазовых веществ // ИФЖ. 1982. Т. 42, № 6. С. 1026 – 1027.
17. **Белов Е.А., Соколов Г.Я., Платунов Е.С.** Цифровой экспресс-измеритель теплоотражающих конструкций с прямым отсчетом // Промышленная теплотехника. 1986. № 4. С. 756 – 760.
18. **Беляев Н.М., Рядно А.А.** Методы теории теплопроводности: В 2 ч. М.: Высшая школа, 1982. 671 с.
19. **Береговой В.А.** Теплофизические свойства композиционных материалов для защиты от радиации: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Пенза. 1997. 18 с.

20. Берд Р., Стьюарт В., Лайтфут Е. Явления переноса: Пер. с англ. М.: Химия, 1974. 688 с.
21. Бесекерский В.А., Попов Е.П. Теория систем автоматического регулирования. М.: Наука, 1972. 766 с.
22. Блох А.Г. Основы теплообмена излучением. М.–Л.: Госэнергоиздат, 1962. 330 с.
23. Блохин Ю.Н., Алекс А.О. // Приборы и системы управления. 1989. № 1. С. 14 – 15.
24. Богословский В.Н. Тепловой режим здания. М.: Стройиздат, 1979.
25. Богословский В.Н. Строительная теплофизика. М.: Стройиздат. 1982.
26. Богуславский Л.Д. Энергосбережение в системах теплоснабжения, вентиляции и кондиционирования воздуха: Справочное пособие. М.: Стройиздат, 1990.
27. Бойков Г.П., Видин Ю.В., Фокин В.М. *Определение теплофизических свойств строительных материалов. Красноярск: Изд-во Красноярского университета. 1992. 172 с.*
28. Бойков Г.П., Видин Ю.В., Журавлев В.Н. Основы тепломассообмена. Красноярск, 2000. 272 с.
29. Бровкин Л.А. Определение коэффициента температуропроводности при квазистационарном режиме // Заводская лаборатория. 1961. Т. 27, № 5. С. 578 – 581.
30. Бровкин Л.А., Девочкина С.И. Температурное поле шара с переменными физическими свойствами при граничных условиях третьего рода // Изв. вузов. Энергетика. 1971. № 11.
31. Бровкин В.Л. Частное решение уравнения теплопроводности для определения теплофизических коэффициентов // Изв. вузов. Энергетика. 1980. № 11. С. 120.
32. Бувин Н.П. Экспериментальное исследование динамических характеристик термодатчиков // Приборостроение. 1960. № 10. С. 1 – 4.
33. Бувин Н.П. Исследование динамических свойств промышленных термодатчиков // Теплоэнергетика. 1960. № 11. С. 49 – 54.
34. Буравой С.Е., Платунов Е.С. Установка для измерения истинной теплоемкости жаростойких материалов в режиме охлаждения // Теплофизика высоких температур. 1966. Т. 4. № 3. С. 459 – 462.
35. Бутковский А.Г. Характеристики систем с распределенными параметрами: Справочное пособие. М.: Наука, 1979. 224 с.
36. Вавилов В.П. Тепловые методы неразрушающего контроля: Справочник. М.: Машиностроение, 1991. 240 с.
37. Варганов И.С., Геращенко О.А. Тепловой метод неразрушающего контроля с помощью датчика теплового потока // Промышленная теплотехника. 1987. № 4. С. 77 – 80.
38. Васильев Л.Л., Фрайман Ю.Е. Теплофизические свойства плохих проводников тепла. Минск: Наука и техника, 1967. 172 с.
39. Волохов Г.М. Определение коэффициента температуропроводности при реализации комбинированных граничных условий // ИФЖ. 1966. Т. 11. № 5. С. 582 – 586.
40. Волькенштейн В.С. Скоростной метод определения теплофизических характеристик материалов. Л.: Энергия, 1971. 145 с.
41. Видин Ю.В. Инженерные методы расчетов процессов теплопереноса. Красноярск, 1974. 144 с.
42. Видин Ю.В., Иванов В.В. Расчет температурных полей в твердых телах, нагреваемых конвекцией и радиацией одновременно. Красноярск, 1965. 95 с.
43. Видин Ю.В., Воронков Г.В., Кондратьев Е.А. Законы распределения тепла в телах конечных размеров и их приложение к нагреву суммарным тепловым потоком // Теплофизика высоких температур. 1969. № 4. С. 795.
44. Вик, Эзикши. Квазистационарное распределение температуры в периодически контактирующих стержнях конечной длины // Теплопередача // Труды американского общества инженеров-механиков. 1981. № 1. С. 149.
45. Власов В.В. Автоматические устройства для определения теплофизических характеристик твердых материалов. М.: Машиностроение, 1977. С. 168.
46. Гаврилов Р.Н., Никифоров Н.Д. Метод определения теплофизических свойств горного массива без нарушения естественной структуры // ИФЖ. 1983. № 6. С. 1023 – 1024.
47. Гагарин В.Г. Теория состояния и переноса влаги в строительных материалах и теплозащитные свойства ограждающих конструкций зданий // Докторская диссертация. НИИСФ. М., 2000.
48. Геращенко О.А. Основы теплотриии. Киев: Наукова думка, 1971. 192 с.

49. **Герашенко О.А.** Современное состояние теплотрии в СССР // ИФЖ. 1990. Т. 59, № 3. С. 516 – 522.
50. **Герашенко О.А., Гордов А.Н., Лах В.И.** Температурные измерения: Справочник. Киев: Наукова думка, 1984. 496 с.
51. **Герашенко О.А., Гриценко Т.Г.** Теплотрический метод определения комплекса теплофизических свойств вещества при гармоническом теплоточном воздействии // Теплофизика и теплотехника. Киев: Наукова думка, 1979. Вып. 36. С. 19 – 22.
52. **Гордов А.Н.** Основы пирометрии. М.: Металлургия, 1971. 447 с.
53. **Гордов А.Н., Малков Я.В., Эргардт Н.Н.** Точность контактных методов измерения температуры. М.: Изд-во стандартов, 1976. 232 с.
54. **Горлов Ю.П., Меркин А.П., Устенко А.А.** Технология теплоизоляционных материалов. М.: Стройиздат, 1980. 399 с.
55. **Горайнов К.Э., Горайнова С.К.** Технология теплоизоляционных материалов и изделий. М.: Стройиздат, 1982. 375 с.
56. **ГОСТ 8.009–72.** Государственная система обеспечения единства измерений. Нормируемые метрологические характеристики средств измерений.
57. **ГОСТ 8.157–75.** Государственная система обеспечения единства измерений. Шкалы температурные практические.
58. **ГОСТ 11.004–74.** Прикладная статистика. Правила определения оценок и доверительных границ для параметров нормального распределения.
59. **ГОСТ 23789–79.** Метод испытаний. М.: Издательство стандартов, 1980. 12 с.
60. **ГОСТ 310.4–81.** Цементы. Методы определения предела прочности при изгибе и сжатии. М.: Издательство стандартов. 1981. 18 с.
61. **Грановский В.А., Сирая Т.Н.** Методы обработки экспериментальных данных при измерениях. Л.: Энергоатомиздат, 1990. 287 с.
62. **Гусева Л.И.** Комплексные исследования теплофизических характеристик теплоизоляционно-теплозащитных материалов длительного и многократного применения: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. М., 1981. 20 с.
63. **Гурьев М.Е.** Тепловые измерения в строительной теплофизике. Киев, 1976. С. 93 – 105.
64. **Дао Тхай Зиеу, Ковальчук Н.Г., Пытель И.Д.** Минимизация погрешности измерения стационарных температур динамическим методом // Известия вузов. Приборостроение. 1985. Т. 28. № 7. С. 92 – 95
65. **Данилов Н.Д.** Способ определения теплофизических характеристик материалов. А.с. СССР № 293209.
66. **Датчик теплового потока / М.Е. Гуревич, Л.В. Гурьянов, Ю.П. Золотаренко, Ю.Н. Коваль / А.с. СССР 1267176. БИ. 1986. № 40.**
67. **Деч Г.** Руководство к практическому применению преобразования Лапласа и 2-преобразования. М.: Наука, 1971. 288 с.
68. **Динамика теплообмена комбинированного тепломера / Н.А. Ярышев, Т.В. Смирнова, Н.Н. Заровская, Г.А. Васильев // Измерительная техника. 1990. № 2. С. 15 – 16.**
69. **Дмитрович А.Д.** Определение теплофизических свойств строительных материалов. М.–Л.: Госстройиздат, 1963. 204 с.
70. **Дульнев Г.Н., Заричняк Ю.П.** Теплопроводность смесей и композиционных материалов. Л.: Энергия, 1974, 264 с.
71. **Дульнев Г.Н., Сигалов А.В.** Температуропроводность неоднородных систем // ИФЖ. 1980. Т. 39. № 5. С. 859.
72. **Дульнев Г.Н., Лукьянов Г.Н.** Комплекс методик, программ и аппаратуры для автоматизации теплофизических исследований // ИФЖ. 1981. Т. 40. № 4. С. 717.
73. **Дульнев Г.Н.** Тепло- и массообмен в радиоэлектронной аппаратуре. М.: Высшая школа, 1984. 247 с.

74. **Загребин Л.Д.** Импульсный метод измерения теплофизических свойств металлов с использованием лазерного нагрева: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Свердловск, 1982. 23 с.
75. **Зайдель А.Н.** Ошибки измерений физических величин. Л.: Наука, 1974. 108 с.
76. **Заровная Н.Н., Ярышев Н.А.** Влияние локального нагрева на температуру поверхности тела // Известия вузов. Приборостроение. 1981. Т. 23. № 11. С. 87 – 92.
77. **Заровная Н.Н., Ярышев Н.А.** Анализ локальных тепловых возмущений в полупрозрачных объектах // Теплообмен–УП. Минск: Наука и техника, 1984. С. 58 – 62.
78. **Зинченко Л.А., Садиков И.Н., Фандеев Е.И.** Исследование пневмотермометрического метода измерения температуры движущихся лент // Известия вузов. Энергетика. 1975. № 9. С. 134 – 138.
79. **Золотухин А.В., Клименко В.С., Синицкий Н.Е.** Комплексная автоматическая калориметрическая установка для измерения тепловых свойств твердых веществ // Промышленная теплотехника. 1983. Т. 5. № 2. С. 91 – 96.
80. **Егоров Б.Н., Килессо В.С.** Комплексное определение теплофизических свойств твердых материалов импульсно-адиабатическим методом // Теплофизические свойства твердых тел. Киев: Наукова думка. 1971. С. 65 – 71.
81. **Елисеев В.Н., Воротников В.И., Товстоног В.А.** Оценка погрешности измерения поверхностной температуры полупрозрачного материала контактным датчиком // Известия вузов. Машиностроение. 1981. С. 77 – 81.
82. **Елисеев В.Н., Соловов В.А.** Теоретическое и экспериментальное исследование погрешности измерения температур термодарами в теплоизоляционных материалах // Инженерно-физический журнал. 1983. Т. 45. № 5. С. 737 – 742.
83. **Елисеев В.Н., Соловов В.А.** Теоретическое и экспериментальное исследование погрешности измерения температур термодарами в теплоизоляционных материалах // ИФЖ. 1983. № 5. С. 737 – 742.
84. **Епифанов Г.И.** Физика твердого тела. М.: Высшая школа, 1977.
85. **Иванова А.Г., Тартаковский Д.Ф.** Метод определения динамических свойств поверхностных термодаров // Метрология. 1975. Вып. 1. С. 50 – 58.
86. **Иванова Г.М., Кузнецов Н.Д., Чистяков В.С.** Теплотехнические измерения и приборы. М.: Энергоатомиздат, 1984. С. 140.
87. **Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С.** Теплопередача. М.: Энергия, 1975. 488 с.
88. **Кассандрова О.Н., Лебедев В.В.** Обработка результатов наблюдений М.: Наука, 1970. 109 с.
89. **Кайданов А.И.** Влияние токоведущих проводников на точность измерения температур с помощью измерительных термисторов // Известия вузов. Приборостроение. 1970. Т. 13. № 10. С. 81 – 86.
90. **Карслоу Г., Егер Д.** Теплопроводность твердых тел. М.: Наука, 1964. 487 с.
91. **Кельтнер, Бек Дж.** Погрешности измерения температур поверхностей // Теплопередача. 1983, Т. 105. № 2. С. 98 – 106.
92. **Керн Д., Краус А.** Развитие поверхности теплообмена: Пер. с англ. М.: Энергия, 1977. 462 с.
93. **Кириченко Ю.А.** Измерение температуропроводности методом радиальных температурных волн в цилиндре // Измерительная техника. 1960. № 5. С. 29 – 32.
94. **Клименко М.М., Кржижановский Р.Б., Шерман В.Е.** Анализ методических погрешностей измерения температуропроводности импульсным методом с применением лазера // Измерительная техника. 1980. № 6.
95. **Ковальчук Н.Г., Пытель И.Д.** Оптимизация временных параметров температурных возмущений при определении инерционности термопреобразователей // Метрология. 1984. № 3. С. 45 – 49.
96. **Ковальков В.П.** Метод определения коэффициента температуропроводности при нагревании или охлаждении тел простой формы в случае произвольных краевых условий // Заводская лаборатория. 1975. Т. 41. № 3. С. 295.
97. **Козлов В.П., Липовцев В.Н., Писарик Г.П.** Аналитические основы неразрушающих способов комплексного определения теплофизических характеристик материалов // Промышленная теплотехника. 1987. № 2. С. 96 – 102.
98. **Коздоба Л.А.** Методы решения нелинейных задач теплопроводности. М.: Наука, 1975. 227 с.
99. **Коздоба Л.А., Круковский П.Г.** Методы решения обратных задач теплопереноса. Киев: Науко-

ва думка, 1982. 360 с.

100. **Кондратьев Г.М.** Регулярный тепловой режим. М.: Гостехиздат, 1954. 408 с.
101. **Кондратьев Г.М.** Тепловые измерения. Л.: Машгиз, 1957. 240 с.
102. **Контрольно-измерительная техника** // Сб. статей. Львов: Вища школа, 1983. Вып. 33. 148 с.
103. **Контрольно-измерительные приборы и средства автоматизации.** Каталог продукции компании ОВЕН, 2003 г. 152 с.
104. **Коротков П.А., Лондон Г.Е.** Динамические контактные измерения тепловых величин. Л.: Машиностроение, 1974. 224 с.
105. **Краус М., Вошни Э.** Измерительные информационные системы. М.: Мир, 1975. 312 с.
106. **Краев О.А.** Простой метод измерения теплопроводности теплоизоляторов // Теплоэнергетика. 1958. № 4. С. 81 – 82.
107. **Крейт О., Блек У.** Основы теплопередачи. М.: Мир, 1983. 256 с.
108. **Кржжижановский Р.Е.** Теплопроводность и электропроводность металлов и сплавов. М.: Металлургия, 1967. 285 с.
109. **Кузнецов Н.Д., Чистяков В.С.** Сборник задач и вопросов по теплотехническим измерениям и приборам. М.: Энергия, 1978. 215 с.
110. **Куинн Т.** Температура: Пер. с англ. М.: Мир, 1985. 448 с.
111. **Кулаков М.В.** Технологические измерения и приборы для химических производств: Учебник для вузов. М.: Машиностроение, 1983. 424 с.
112. **Кулаков М.В., Макаров Б.И.** Измерение температуры поверхности твердых тел. М.: Энергия, 1979. 96 с.
113. **Куритный И.П., Бурханов Г.С., Стадник Б.И.** Материалы высокотемпературной термометрии. М.: Металлургия, 1986. 208 с.
114. **Курепин В.В., Козин В.М., Левочкин Ю.В.** Приборы для теплофизических измерений с прямым отсчетом // Промышленная теплотехника. 1982. Т. 4. № 3. С. 91.
115. **Курепин В.В., Петров Г.С., Карпов В.Г.** Промышленные теплофизические приборы первого поколения // Промышленная теплотехника. 1981. Т. 3. № 1. С. 29 – 31.
116. **Курепин В.В., Платунов Е.С.** Приборы для исследования теплопроводности и теплоемкости в режиме монотонного разогрева // Изв. вузов. Приборостроение. 1966. Т. 9. С. 127 – 130.
117. **Курепин В.В., Дикалов А.И.** Определение теплофизических характеристик методом мгновенного теплового импульса при учете влияния контактных термических сопротивлений // ИФЖ. 1981. Т. 40. № 6. С. 1046.
118. **Курепин В.В., Калинин В.А.** Скоростной метод определения коэффициента теплопроводности и теплопроводности твердых тел // Изв. Северо-Кавказского научного центра высшей школы. Естественные науки. 1979. № 2. С. 24.
119. **Курепин В.В., Платунов Е.С., Белов Е.А.** Энтальпийный термозонд для неразрушающего контроля теплофизических свойств материалов // Промышленная теплотехника. 1982. № 4. С. 78.
120. **Кутателадзе С.С., Боришанский В.М.** Справочник по теплопередаче. М.–Л.: Госэнергоиздат, 1958. 414 с.
121. **Кутателадзе С.С.** Основы теории теплообмена. Новосибирск: Наука, 1970. 659 с.
122. **Лабейш В.Г., Пименов А.Г., Чудинов С.Н.** Определение инерционности датчиков поверхности температуры по методике периодического нагрева // Изв. вузов. Приборостроение. 1983. Т. 26. № 11. С. 88 – 90.
123. **Левицкий М.П.** О температуре поверхности трения твердых тел // Журнал технической физики. 1949. Т. 19. № 9. С. 1010 – 1014.
124. **Лесков В.П.** Численные методы решения уравнения теплопроводности / Читинский ГТУ. Чита. 1997. 96 с.
125. **Линевег Ф.** Измерение температур в технике: Справочник / Пер. с нем. М.: Металлургия, 1980. 544 с.
126. **Ли, Тейлор.** Теплопроводность материала с диспергированными включениями // Теплопередача: Труды американского общества инженеров-механиков. 1978. № 4. С. 177 – 182.

127. **Литовский Е.Я., Пучкелевич Н.А.** Теплофизические свойства огнеупоров: Справочник. М.: Металлургия, 1982. 152 с.
128. **Луцаев Г.А., Борц Г.Н., Фандеев Е.И.** Исследование погрешностей датчиков температуры непогружного типа, содержащих тепловые экраны // Изв. вузов. Приборостроение. 1973. № 4. С. 124.
129. **Луцаев Г.А., Фандеев Е.И., Ушаков В.Г.** Аналитическое исследование и разработка метода рационального проектирования датчиков температуры непогружного типа // Рабочие процессы топливных систем дизелей: Труды НПИ. Новочеркасск, 1972. Т. 251. С. 107 – 112.
130. **Луцаев Г.А., Ушаков В.Г., Фандеев Е.И., Додина Т.А.** Исследование динамических характеристик контактных датчиков температуры непогружного типа // Теплоэнергетика: Труды НПИ. Новочеркасск, 1973. Т. 275. С. 92 – 103.
131. **Луцаев Г.А., Фандеев Е.И.** Проектирование контактных непогружных термоприемников с заданными метрологическими характеристиками // Изв. вузов. Электромеханика. 1974. № 10. С. 1142 – 1148.
132. **Луцаев Г.А., Фандеев Е.И., Ушаков В.Г.** Исследование погрешности термометров сопротивления, вызванной нагревом их чувствительных элементов измерительным током // Изв. вузов. Сер. Электромеханика. 1972. № 1. С. 63 – 66.
133. **Лыков А.В.** Теория теплопроводности. М.: Высшая школа, 1967. 599 с.
134. **Лыков А.В.** Теплообмен: Справочник. М.: Энергия, 1978. 480 с.
135. **Лыков А.В.** Теоретические основы строительной теплофизики. Минск: Наука и техника, 1961. 519 с.
136. **Мак Адамс В.Х.** Теплопередача. М.: Металлургия, 1961. 686 с.
137. **Марич М.** Совместное определение теплофизических характеристик материалов // ИФЖ. 1973. Т. 25. № 5. С. 851.
138. **Методы определения теплопроводности и температуропроводности /** Под ред. А.В. Лыкова. М.: Энергия, 1973. 336 с.
139. **Михеев М.А., Михеева И.М.** Основы теплопередачи. М.: Энергия, 1973. 319 с.
140. **Михеев М.А.** Краткий курс теплопередачи. М.: Госэнергоиздат, 1961. 208 с.
141. **Мецик М.С.** Методы обработки экспериментальных данных и планирование эксперимента по физике. Иркутск: Иркутский гос. ун-т. 1981. 111 с.
142. **Ненароков Н.Ю.** Математическое моделирование процессов теплопереноса при исследовании теплофизических характеристик веществ и материалов в стадии иррегулярного режима: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. М., 2000.
143. **Нестационарный теплообмен /** В.К. Кошкин, Э.К. Калинин, Г.А. Дрейцер и др. М.: Машиностроение, 1973. 328 с.
144. **Новицкий Л.А., Кожевников И.Г.** Теплофизические свойства материалов при низких температурах: Справочник. М.: Машиностроение, 1975. 216 с.
145. **Новицкий П.В.** Динамика погрешностей средств измерений. Л.: Энергоатомиздат, 1990. 192 с.
146. **Новицкий П.В., Зограф И.А.** Оценка погрешностей результатов измерений. Л.: Энергоатомиздат, 1991. 301 с.
147. **Новиченок Л.Н., Шульман З.П.** Теплофизические свойства полимеров. Минск: Наука и техника, 1971. 117 с.
148. Новые исследования в термометрии // Сб. ст. НПО "Термоприбор". Львов: Вища школа, 1974. 180 с.
149. **Осипова В.А.** Экспериментальное исследование процессов теплообмена. М.: Энергия, 1979. 319 с.
150. **Осипова М.Н., Осипова В.А.** Комплексное определение температурной зависимости теплофизических свойств веществ // Теплоэнергетика. 1971. № 6. С. 84 – 85.
151. **Ойков Г., Буриев В.** Исследование влияния ультразвука на теплофизические коэффициенты // Теплофизика и теплотехника. Киев: Наукова думка, 1970. № 16. С. 25 – 26.
152. **Олейник Б.Н.** Точная калориметрия. М.: Изд-во стандартов, 1973. 208 с.

153. **Падерин Л.Я.** Расчетное исследование погрешностей контактного метода измерения температур поверхностей неметаллических материалов в условиях лучистого теплообмена // Теплофизика высоких температур. 1981. Т. 19. № 6. С. 1277 – 1284.
154. **Пак В., Калинин А.И.** Метод точного измерения стационарной температуры поверхности твердого тела контактными термодатчиками // Заводская лаборатория. 1976. Т. 42. № 11. С. 1371 – 1372.
155. **Пак М.И., Осипова В.А.** Квазистационарный метод комплексного определения теплофизических свойств твердых тел в широком температурном интервале // Теплоэнергетика. 1967. № 6. С. 73 – 76.
156. **Паперный Е.А., Эйдельштейн И.Л.** Погрешности контактных методов измерения температур. М.–Л.: Энергия, 1966.
157. **Парцхаладзе К.Г.** Импульсный метод измерения температуропроводности // Труды метрологических институтов СССР. 1971. Вып. 129. С. 86.
158. **Пат. РФ 99117106.** Способ бесконтактного контроля теплофизических характеристик материалов / В.Н. Чернышов, Т.И. Чернышова, Э.В. Сысоев. Заявл. 04.08.97; Опубл. 26.12.2000.
159. **Пат. РФ 2084879.** Способ неразрушающего контроля теплофизических характеристик материалов / В.Н. Чернышев и др. Заявл. 24.04.94; Опубл. 11.04.96, Бюл. № 20. 18 с.
160. **Пелейкий В.Э., Тимрот Д.Л., Воскресенский В.Ю.** Высокотемпературные исследования тепло- и электропроводности твердых тел. М.: Энергия, 1971. 192 с.
161. **Перехоженцев А.Г.** Потенциал переноса влаживлажных капиллярно-пористых материалов: Дис. ... д-ра техн. наук / НИИСФ. М., 1998.
162. **Петров В.Г., Денисов В.Г., Масленников Л.А.** Процессы тепло- и влагообмена в промышленной изоляции. М.: Энергоатомиздат, 1983. 192 с.
163. **Петрунин Г.И., Юрчак Р.П.** Установка для измерения температуропроводности материалов методом плоских температурных волн // Техника высоких температур. 1971. Т. 9. № 3. С. 622 – 626.
164. **Петашвили О.М., Цибиногин О.Г.** Измерение температуры продуктов сгорания. М.: Энергоатомиздат, 1984. 112 с.
165. **Петунии А.Н.** Измерение параметров газового потока. М.: Машиностроение, 1974. 260 с.
166. **Пехович А.И., Жидких В.М.** Расчеты теплового режима твердых тел. Л.: Энергия, 1976. 352 с.
167. **Платунов Е.С., Козин В.М., Левочкин Ю.В.** Цифровой экспресс-измеритель теплофизических свойств вещества // Промышленная теплотехника. 1982. Т. 4. № 1. С. 51 – 65.
168. **Платунов Е.С.** Теплофизические измерения в монотонном режиме. Л.: Энергия, 1973. 143 с.
169. **Пинчевский А.Д.** Оптимизация динамических характеристик термопреобразователей погружения. М.: Изд-во стандартов, 1988. 64 с.
170. **Пинчевский А.Д.** Проектирование термопреобразователей с распределенными параметрами // Контрольно-измерительная техника. 1983. № 34. С. 83 – 86.
171. **Попов В.М.** Теплообмен в зоне контакта разъемных и неразъемных соединений. М.: Энергия, 1971.
172. **Попов В.М.** Теплообмен через соединения на клеях. М.: Энергия, 1974. 304 с.
173. **Попов В.Н.** Об искажении температурного поля в области заделки термопары // Теплофизика высоких температур. 1966. Т. 4. № 2. С. 112 – 115.
174. **Преображенский В.П.** Теплотехнические измерения и приборы. М.: Энергия, 1978. 704 с.
175. **Приборы** для измерения температуры контактным способом / Под ред. Р.В. Бычковского. Львов: Вища школа, 1978. 208 с.
176. **Приборы** для измерения температуры поверхностей / Обзорн. информация: Приборы, средства автоматизации и системы управления. ТС–6. Вып. 1. М.: ИНИИТЭИ, 1986. 40 с.
177. **Приборы** для измерения температуры контактным способом: Справочник / Под общ. ред. Р.В. Бычковского. Львов: Вища школа, 1979. 208 с.
178. **Рабинович С.Г.** Погрешности измерений. Л.: Энергия, 1978. 262 с.
179. **Рудзит Я.А., Путалов В.Н.** Основы точности и надежность в приборостроении. М.: Машиностроение, 1991. 302 с.

180. **Савватимский А.И.** Экспериментальное определение физических свойств веществ при микросекундном нагреве импульсом электрического тока: Автореф. дис. ... д-ра техн. наук. М., 1999.
181. **Савинцев П.А., Исаков Ж.А., Зильберман П.Ф.** Исследование электрических и тепловых свойств при контактном плавлении образцов системы $KNO_3 - NaNO_3$ // Известия АН СССР. Неорганические материалы. 1980. № 12. С. 2263 – 2264.
182. **Самсонов Г.В.** Датчики для измерения температуры в промышленности. Киев: Наукова думка, 1972. 224 с.
183. **Сапожников С.З., Серых Г.М.** Способ определения теплофизических свойств материалов. А.с. 458753. Заявл. 14.08.73; Опубл. 1975. Бюл. № 4.
184. **Саченко А.А., Твердый Е.Я.** Совершенствование методов измерения температуры. Киев: Техника, 1983. 104. С. 76.
185. **Сергеев О.А.** Метрологические основы теплофизических измерений. М.: Изд-во стандартов, 1972. 170 с.
186. **Серых Г.М., Колесников Б.П., Сысоев В.Г.** Прибор для комплексного определения теплофизических характеристик материалов // Промышленная теплотехника. 1981. Т. 3. № 1. С. 85 – 91.
187. **Сперроу Э.М., Сесс Р.Д.** Теплообмен излучением. Л.: Энергия, 1971. 294 с.
188. **Симбирский Д.Ф.** Температурная диагностика двигателей. Киев: Техника, 1976. 208 с.
189. **СНиП П-3-79***. Строительная теплофизика. М.: Стройиздат, 1996.
190. **Соболь И.М.** Метод Монте-Карло. М.: Наука, 1985. 78 с.
191. **Табунщиков Ю.А., Хромец Д.Ю.** Тепловая защита ограждающих конструкций зданий и сооружений. М.: Стройиздат, 1986.
192. **Тайнц Н.Ю.** Технология нагрева стали. М.: Metallurgizdat, 1962. 442 с.
193. **Теоретические основы хладотехники. Теплообмен** / Под ред. проф. Э.И. Гуйго. М.: Агропромиздат, 1986. 320 с.
194. **Теория теплообмена** / Под ред. А.И. Леонтьева. М.: Высшая школа, 1979. 567 с.
195. **Теплотехника** / Под общ. ред. В.Н. Луканина. М.: Высшая школа, 2002.
196. **Тепло- и массообмен. Теплотехнический эксперимент: Справочник** / Под общ. ред. В.А. Григорьева и В.М. Зорина. М.: Энергоиздат, 1982. 512 с.
197. **Теплотехнический справочник** / Под общ. ред. В.И. Юренева и П. Д. Лебедева. М.: Энергия, 1975. Т. 2. 896 с.
198. **Теплофизические свойства веществ** / Под ред. Н.Б. Варгафтика. М.–Л.: Госэнергоиздат, 1956. 367 с.
199. **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.
200. **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.
201. **Темкин А.Г.** Обратные методы теплопроводности. М.: Энергия, 1973. 464 с.
202. **Термоэлектрический измеритель теплового потока** / В.Л. Налетов, Н.П. Дивин, А.С. Зайцев // Приборы и техн. эксперим. 1990. № 5. С. 248.
203. **Тихонов А.Н., Самарский А.А.** Уравнения математической физики. М.: Наука, 1972. 735 с.
204. **Ткаченко А.Г., Ушаков В.Г.** Экспериментальное исследование тепловой проводимости воздушного зазора между бесконтактным датчиком температуры и движущимся плоским объектом // Изв. вузов. Энергетика. 1973. № 9. С. 87– 90.
205. **Факторович Л.М.** Тепловая изоляция: Справочное руководство. Л.: Недра, 1966. 456 с.
206. **Фандеев Е.И., Луцаев Г.А.** Исследование датчиков температуры пристенного слоя на аналоговых вычислительных машинах // Изв. вузов. Приборостроение. 1969. № 11. С. 119–123.
207. **Фандеев Е.И., Ушаков В.Г., Луцаев Г.А.** Непогружаемые термоприемники. М.: Энергия, 1979. 64 с.
208. **Фокин В.М.** Научно-методологические основы определения теплофизических свойств материалов методом неразрушающего контроля. М.: Издательство "Машиностроение-1", 2003. 140 с.
209. **Фокин В.М.** Температуропроводность ионных кристаллов // Изв. вузов. Северо-Кавказский регион. Технические науки. 1994. № 3 – 4. С. 41 – 46.

210. **Фокин В.М., Шаронова О.В., Бойков Г.П.** Оценка наступления упорядоченной части теплового периода при нагревании бруса квадратного сечения // Изв. Северо-Кавказского научного центра высшей школы. Технические науки. 1988. № 2. С. 62 – 65.
211. **Фокин В.М., Иванов В.В., Бойков А.Г.** Приложение закономерностей упорядоченного теплового режима к опытам с минеральной ватой // Изв. вузов. Строительство. 1996. № 2. С. 122 – 124.
212. **Фокин В.М.** Теоретические основы оптимизации теплотехнических характеристик ограждающих конструкций: Учебное пособие с грифом УМО "Теплоэнергетика. ВолгГАСА. Волгоград. 2003. 140 с.
213. **Фокин В.М.** *Определение температуропроводности строительных материалов. Монография. ВолгГАСА. Волгоград. 2002. 127 с.*
214. **Фокин В.М., Семенова Т.А., Бойков Г.П.** Определение температуропроводности строительных материалов в телах кубической формы. Научное издание. ВолгГАСА. Волгоград. 2001. 36 с.
215. **Фокин К.Ф.** Строительная теплотехника ограждающих частей зданий. М.: Стройиздат, 1973.
216. **Фомичев Е.Н., Кандыба В.В., Кантор П.Б.** Калориметрическая установка для определения энтальпии и теплоемкости веществ // Измерительная техника. 1962. № 5. С. 15 – 18.
217. **Филиппов Л.П.** Измерения теплофизических свойств веществ методом периодического нагрева. М.: Энергоатомиздат, 1984.
218. **Филиппов Л.П.** Направления развития методов измерений теплофизических свойств веществ и материалов // Энергетика. 1980. № 3. С. 125.
219. **Физические** величины: Справочник / Под ред. И.С. Григорьева, Е.З. Мейлихова. М.: Энергоатомиздат, 1991. 232 с.
220. **Франчук А.У.** Таблицы теплотехнических показателей строительных материалов. М.: Госстрой СССР, НИИ Стройфизики, 1969. 128 с.
221. **Фрумкин В.Д., Рубичев Н.А.** Теория вероятностей и статистика в метрологии и измерительной технике. М.: Машиностроение, 1987. 168 с.
222. **Фукс Л.Г., Шмандина В.Н.** Метод комплексного определения теплофизических свойств // Изв. вузов. Энергетика. 1970. № 2. С. 124 – 126.
223. **Харламов А.Г.** Измерение теплопроводности твердых тел. М.: Атомиздат, 1973. 151 с.
224. **Цветков Э.И.** Методические погрешности статистических измерений. Л.: Энергоатомиздат, 1984. 144 с.
225. **Цветков Э.И.** Алгоритмические основы измерений. Энергоатомиздат, 1992. 254 с.
226. **Цирельман Н.М.** Способ определения коэффициента температуропроводности. А.с. СССР 539264.
227. **Черкасова К.Г.** Измерение температуры поверхности // Труды метрологических ин-тов СССР / ВНИИМ. 1977. № 207 (267). С. 64 – 68.
228. **Чернышов В.Н.** Разработка теоретических основ и алгоритмического обеспечения неразрушающего контроля теплофизических свойств материалов с метрологическим анализом полученных результатов: Дис. ... д-ра техн. наук. Л., 1997. 496 с.
229. **Чернышова Т.И., Чернышов В.Н.** Методы и средства контроля теплофизических свойств материалов. М.: Издательство "Машиностроение", 2001. 240 с.
230. **Черпаков П.В.** Теория регулярного теплообмена. М.: Энергия, 1975. 225 с.
231. **Чеховский В.Я., Беляев Ю.В., Вавилов Р.А.** Установка для измерения тепло- и температуропроводности твердых материалов // ИФЖ. 1972. Т. 22. № 6. С. 1049.
232. **Чиркин В.С.** Теплопроводность промышленных материалов. М.: Машгиз, 1962. 247 с.
233. **Чистяков С.Ф., Радун Д.Б.** Теплотехнические измерения и приборы. М.: Высшая школа, 1972. 392 с.
234. **Чудновский А.Ф.** Теплофизические характеристики дисперсных материалов. М.: Физматгиз, 1962. 456 с.

235. **Чуриков А.А.** Разработка и исследование методов и устройств для автоматического неразрушающего контроля температурозависимых теплофизических свойств твердых теплозащитных материалов: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. М., 1980. 16 с.
236. **Шаронова О.В., Видин Ю.В., Бойков Г.П.** Упорядоченный тепловой режим в твердых телах. Красноярск: Красноярский политех. ин-т, 1975. 64 с.
237. **Шаронова О.В., Фокин В.М.** Упорядоченный тепловой режим в брусе квадратного сечения // Вопросы теплообмена в строительстве. Ростов-н/Д, 1986. С. 79 – 84.
238. **Шашков А.Г., Волохов Г.М., Абраменко Т.М.** Методы определения теплопроводности и температуропроводности. М.: Энергия, 1973. С. 165 – 178.
239. **Шашков А.Г.** Системно-структурный анализ процесса теплообмена и его применение. М.: Энергоатомиздат, 1983. 280 с.
240. **Шевельков В.А.** Теплофизические характеристики изоляционных материалов. М., 1958. 96 с.
241. **Шенк Х.** Теория инженерного эксперимента. М.: Мир, 1972. 381 с.
242. **Шейнери, Мартин.** Температуропроводность высоконаполненного каучука // Теплопередача. Труды американского общества инженеров-механиков. 1974. № 2. С. 129 – 130.
243. **Шлыков Ю.П., Ганин Е.А.** Контактный теплообмен. М.–Л.: Госэнергоиздат, 1963.
244. **Шлыков Ю.П., Ганин Е.А., Царевский С.Н.** Контактное термическое сопротивление. М.: Энергия, 1977. 328 с.
245. **Шорин С.Н.** Теплопередача. М.: Высшая школа, 1964. 490 с.
246. **Шукшунов В.Е.** Корректирующие звенья в устройствах измерения нестационарных температур. М.: Энергия, 1970. 118 с.
247. **Эталонные и образцовые измерительные приборы и установки: Справочник. "Интерэталон-прибор".** М.: Изд-во стандартов, 1990. 135 с.
248. **Эккерт Э.Р., Дрейк Р.М.** Теория тепло- и массообмена. М.–Л.: Госэнергоиздат, 1961. 680 с.
249. **Юрчак Р.П., Ткач Г.Ф., Петрунин Г.И.** Исследование теплофизических свойств диэлектриков при высоких температурах // Теплофизические свойства твердых веществ. Киев: Наукова думка. 1973. С. 83 – 87.
250. **Ярышев Н.А.** Передаточные функции для температуры тела при обобщенных тепловых воздействиях // ИФЖ. 1970. Т. 18. № 5. С. 892 – 898.
251. **Ярышев Н.А.** Расчет температуры тел в стационарном режиме теплообмена // Изв. вузов. Приборостроение. 1970. Т. 13. № 3. С. 134 – 137.
252. **Ярышев Н.А.** Теоретические основы измерения нестационарных температур. Л.: Энергия, 1967. 300 с.
253. **Ярышев Н.А., Андреева Л.Б.** Тепловой расчет термостатов. Л.: Энергоатомиздат, 1984. 176 с.
254. **Ярышев Н.А.** Теоретические основы измерения нестационарной температуры: 2-е изд., перераб. Л.: Энергоатомиздат, 1990. 256 с.
255. **Яскин А.С.** Комплексный метод определения теплопроводности, теплоемкости и температуропроводности керамических материалов при температурах до 2000 °С: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. М., 1989. 18 с.
256. **Bardon J.P.** Conses derreurs en thermometrie par contact dans un milieu solidy / Rev. prat. contr. ind. 1975. Vol. 14. N 75. P. 21 – 31.
257. **Champoussin I.C.** Sur la pertinence des modeles thermocinetiques et leestimation de levrscaracteristiques // Heat and Mass Trasfer. 1983. N 8. P. 1229 – 1239.
258. **Chohan R.K.** Effects of manufacturing tolerance on the thermal response of industrial thermometersyy Proc. Inst., Mech. Eng. 1986. Vol. 2000. N 4. P. 285 – 289.
259. **Dantzig J.A.** Improved transient response of thermocouple sensor // Rev. Sei. Instrum. 1985. Vol. 56. N 5. Pt. 1. P. 723 – 725.
260. **Davis L.I.E.** Determination of Physical properties of heat transfer sensors from vacuum soat loss observation // Trans of the Heat Transfer. 1982. N 1. P. 219 – 221.

261. **Gaillard I.L., Galliin F., Wojtyniak B.** A new heat fluxmeter / J. Therm. Anal. 1991. 37, N 8. P. 1973 – 1977. АНГЛ.
262. **Hennecke D.K., Sparrow E.M.** Local heat sink on a convectively cooled surface application to temperature measurement error / Yintern. J. Heat Mass Transfer, 1970. Vol. 13. N 2. P. 15 – 21.
263. **Hofmann D.** Dynamische temperaturmessung. Berlin: VcB Verlag Technik, 1976. 328 s.
264. **Kalliomaki K., Wallin P.** Measurement of surface temperature with a thermally compensated probe // Journ. Physics E: Scientific Instruments. 1971. Vol. 4. N 7. P. 535 – 537.
265. **Krischer O., Esdorn H.** Einfachen Kurzzeitverfahren zur gleichzeitigen Bestimmung der Wärmeleitzahe, der Wärmekaparitat und Warmeindringzahe fester Stoffe. VDI, Forschungsheft. 450/1955.
266. **Lanivik M.** Thermometry by surface probes / High Temp. High Pressures. 1983. Vol. 15. N 2. P. 199 – 204.
267. **Mikroprozessoren** bieten überlegen Vorteile: Nene Wege beider Wözmemessung / Stobbe Matthias // JKZ – Haustechn. 1991. N 2. P. 39 – 41. Нем.
268. **Neuez** Heizkosten – verteiler // Sanit. Heizungstechn. 1990. 55. N 11. P. 680. Нем.
269. **Peek M.K., Salt H.** Measurement of transient temperatures at the centre of a sphere // J. Phys. E: Sci. Instrum. 1987. Vol. 20. N 4. P. 395 – 398.
270. **Robertson D., Sterbutzel G.A.** An accurate surface temperature measuring system // IEEE Transactions. Industria. General Applications. 1970. Vol. 6. N 1. P. 43 – 47.
271. **Satyamurty P., Dixit N.S., Prasad M.P.** Dynamic thermocouple technique to measure high gastream temperatur / Res, and Ind. 1985. Vol. 30. N 4. P. 494 – 500.
272. **Tarzia D.A.** Simultaneous determination of two unknown thermal coefficients through of inverse one-phase Lamé-Clapeyron (Stefan) problem with an overspecified condition of the fixed face // Heat and mass transfer. 1983. N 8. P. 1151 – 1157.
273. **Taylor H., Navarro H.** A method to determine and reduce the response time of resistance thermometers under practical conditions. J. Phys.E: Sci. Instrum. 1983. Vol. 16. N 9. P. 916 – 918.
274. **Thin** film temperature heat fluxmeters / Godefroy J.C., Clery M., Gageant C., Francois D., Servouze Y. / Thin Solid Films. 1990. 193 – 194, N 1 – 2. P. 924 – 934. АНГЛ.
275. **Viskanta R. Gross R.** Heat transfer by simultaneous conduction and radiation in an absorbing medium // Heat Transfer. 1962. Vol. 84. P. 73 – 76.