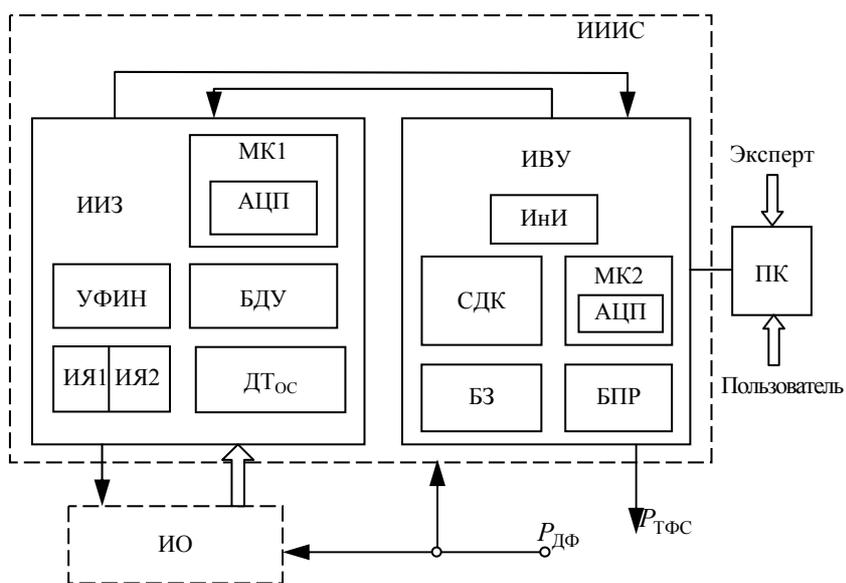


З.М. СЕЛИВАНОВА

# ИНТЕЛЛЕКТУАЛИЗАЦИЯ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ТВЕРДЫХ МАТЕРИАЛОВ



МОСКВА  
"ИЗДАТЕЛЬСТВО МАШИНОСТРОЕНИЕ-1"  
2006

**З.М. СЕЛИВАНОВА**

**ИНТЕЛЛЕКТУАЛИЗАЦИЯ ИНФОРМАЦИОННО-  
ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ НЕРАЗРУШАЮЩЕ-  
ГО КОНТРОЛЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ  
ТВЕРДЫХ МАТЕРИАЛОВ**

---

МОСКВА  
"ИЗДАТЕЛЬСТВО МАШИНОСТРОЕНИЕ-1"  
2006

ДК 681.518.3; 004.89  
ББК ←965,06; ←813  
С29

Р е ц е н з е н т ы:

Доктор технических наук, профессор

*А.Ф. Егоров*

Доктор технических наук, профессор

*А.А. Арзамасцев*

**Селиванова З.М.**

С29 Интеллектуализация информационно-измерительных систем неразрушающего контроля теплофизических свойств твердых материалов. М.: «Издательство Машиностроение-1», 2006. 184 с.

На примере проектирования информационно-измерительной системы неразрушающего контроля теплофизических свойств твердых материалов показаны подходы к интеллектуализации информационно-измерительных систем, построению математических моделей и архитектуры, повышению надежности и метрологическому обеспечению информационно-измерительных систем.

Предназначена для специалистов, занимающихся разработкой информационно-измерительных систем, в том числе системами контроля теплофизических свойств твердых материалов, а также аспирантов и студентов соответствующих специальностей.

УДК 681.518.3; 004.89

ББК ←965,06; ←813

ISBN 5-94275-278-8

© Селиванова З.М., 2006

© "Издательство Машиностроение-1", 2006

Научное издание

СЕЛИВАНОВА Зоя Михайловна

**ИНТЕЛЛЕКТУАЛИЗАЦИЯ ИНФОРМАЦИОННО-  
ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОН-  
ТРОЛЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ТВЕРДЫХ МАТЕ-  
РИАЛОВ**

Монография

Редактор З.Г. Чернова

Инженер по компьютерному макетированию М.Н. Рыжкова

Подписано к печати 05.04.2006.

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

Гарнитура Times New Roman. Объем: 10,69 усл. печ. л.; 10,5 уч.-изд. л.

Тираж 400 экз. С. 179<sup>М</sup>

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

Подготовлено к печати и отпечатано в Издательско-полиграфическом центре

Тамбовского государственного технического университета

392000, Тамбов, Советская, 106, к. 14

По вопросам приобретения книги обращаться по телефону 8(4752)718108

## ВВЕДЕНИЕ

---

Одним из направлений повышения эффективности промышленности является улучшение качества используемых материалов и изделий. В решении задач улучшения качества продукции важную роль играют информационно-измерительные системы (ИИС) и методы неразрушающего контроля (НК), которые повышают точность и оперативность определяемых параметров и свойств готовых изделий, эффективность технологических процессов изготовления материалов.

В последнее время появились публикации, подтверждающие эффективность применения методов искусственного интеллекта в ИИС для различных целей в условиях существенных неопределенностей (в нечеткой среде). Исследования в области искусственного интеллекта позволяют разрабатывать новые модели и методы решения задач, которые ранее не формализовались и не автоматизировались. Современное развитие технических и программных средств создают условия для разработки и внедрения интеллектуальных ИИС, в рамках которых возможно использование гибких и эффективных неформальных подходов.

Работа посвящена интеллектуализации информационно-измерительных систем НК свойств материалов (СМ), вопросам их организации, предназначенных для обработки информации и базирующихся на применении методов искусственного интеллекта.

В отличие от существующих информационно-измерительных систем в работе предложен подход к интеллектуализации, позволяющий повысить эффективность эксплуатации ИИС контроля свойств материалов в условиях неопределенности, и в воздействии дестабилизирующих факторов. При интеллектуализации ИИС используются достижения информационных технологий в процессе принятия решений при контроле свойств материалов в нечеткой среде, методы искусственного интеллекта для решения проблем неразрушающего контроля свойств материалов, нестандартных задач при НК СМ.

Новым в работе является создание подхода к интеллектуализации информационно-измерительных систем не только в рассматриваемой области, но и для ряда других предметных областей.

Имеющийся опыт работы у автора по созданию информационно-измерительных систем неразрушающего контроля теплоизоляционных, строительных, полимерных материалов, позволил использовать накопленную информацию о свойствах материалов, методах контроля качественных свойств материалов в лабораторных, производственных и полевых условиях эксплуатации при создании базы знаний в процессе проектирования интеллектуальных информационно-измерительных систем (ИИИС).

В то же время, при создании ИИИС применялся метод системной интеграции, позволяющий использовать для решения задачи построения ИИС стандартные известные модули, например, микроконтроллеры, АЦП.

Разрабатываемая ИИИС НК СМ, основанная на знаниях, воплотила в себе достоинства измерительно-вычислительных и информационно-измерительных систем для контроля свойств материалов и расширила функциональные возможности, повысила метрологический уровень измерений в результате применения новых информационных и измерительных технологий, методов искусственного интеллекта.

Функционирование системы предполагает использование априорных и апостериорных знаний, математических моделей, представляющих знания в системе, обеспечение измерительного ресурса аппаратных и программных модулей, анализ перспективы и потенциальных возможностей совершенствования интеллектуальных информационно-измерительных систем.

В настоящее время для НК на производстве и в научных проблемных лабораториях применяются информационно-измерительные системы, которые, к сожалению, не в полной мере отвечают всем необходимым техническим характеристикам: оперативности, широкому диапазону исследуемых материалов, возможности контролировать комплекс определяемых параметров, метрологическому уровню результатов измерений, устойчивости к воздействию дестабилизирующих факторов (ДФ), функционированию в условиях неопределенности, возможности перестройки системы в

ходе контроля свойств материалов и технологического процесса изготовления материалов. Анализ известных информационно-измерительных систем показывает, что существующие ИИС не в состоянии контролировать большое число переменных факторов и рационально вести неразрушающий контроль свойств материалов.

Одним из путей повышения эффективности ИИС является решение проблем, возникающих при контроле свойств материалов, применением методов искусственного интеллекта в информационно-измерительных системах.

Проектирование интеллектуальных ИИС выдвигает целый ряд научно-технических проблем, решение которых необходимо для создания эффективных систем контроля свойств материалов. При определении свойств материалов существует проблема описания математическими моделями объектов исследования, измерительных ситуаций из-за нечеткости информации, появляющейся в условиях неопределенности при воздействии дестабилизирующих факторов. Проблему, связанную с дефицитом информации при контроле свойств материалов в условиях неопределенности, предлагается решить на основе интеллектуализации информационно-измерительных систем, позволяющих осуществлять интеллектуальные процедуры принятия решений по выбору оптимальных режимных параметров измерений в зависимости от измерительной ситуации, оптимизацию процедур в соответствии с выбранными критериями – оперативность и точность измерений.

Предложен подход к интеллектуализации ИИС для разрешения проблем НК свойств материалов, заключающийся в принятии решений при классификации исследуемых материалов (ИМ), и распознавании образов, определении оптимальных режимных параметров измерений, выбора метода измерений, учета влияния ДФ и достоверности свидетельств на основе использования теории нечетких множеств, механизма выбора подмножеств стратегий Демпстера-Шафера и фреймового представления знаний, что позволит повысить комплексный показатель достижения результативности (точность и оперативность).

## **1. ЗАДАЧИ И МОДЕЛИ ИНТЕЛЛЕКТУАЛИЗАЦИИ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ**

---

---

Эффективность функционирования ИИС СМ в основном определяется показателями точности, быстродействия и удобства в эксплуатации. На эти показатели существенное влияние оказывают следующие факторы: отсутствие представительных статистических данных при определении свойств новых материалов; влияние большого числа дестабилизирующих факторов на процесс измерения; отсутствие моделей, позволяющих устранить влияние ДФ и выбирать оптимальный режим работы ИИС в зависимости от конкретной измерительной ситуации; недостаточная теоретическая подготовка пользователей для решения таких задач, как выбор метода или измерительного зонда при исследовании материалов; недостаточное использование опыта и знаний специалистов (экспертов) в соответствующей предметной области при реальной эксплуатации ИИС.

Повышение эффективности ИИС достигается решением следующих задач:

- выбор метода и измерительного зонда, обеспечивающих максимальную эффективность ИИС в зависимости от конкретной измерительной ситуации;
- построение математических моделей предметной области, исследуемых материалов, позволяющих в автоматизированном режиме реализовать знания экспертов при выполнении измерений;
- выделение классов материалов, близких по характеристикам, которые оказывают существенное влияние на точность измерения ;
- разработка базы знаний ИИС, содержащей как накопленный опыт пользователя, так и теоретические знания экспертов;
- разработка процедур выработки решений в автоматизированном режиме с учетом достоверности используемых свидетельств;

– представление и использование знаний экспертов при классификации измерительной ситуации, оптимизация режимных параметров измерений.

### 1.1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ ВЫБОРА МЕТОДА КОНТРОЛЯ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ

Эффективность функционирования ИИС СМ во многом определяется используемым методом получения и обработки измерительной информации.

В зависимости от характеристик ИМ, условий, при которых производятся измерения, требований, предъявляемых к точности и быстродействию проводимых измерений, накладываемых ограничений и ряда других факторов, в каждой конкретной ситуации целесообразно использовать тот или иной метод. Значения многих факторов, влияющих на выбор метода, достоверно не известны. Поэтому выбор наиболее рационального метода контроля представляет собой сложную задачу, решаемую в условиях неопределенности.

В достаточно общем виде задача выбора метода контроля формулируется следующим образом.

Задаются:

– множество сведений о свойствах (признаках) исследуемого материала (теплопроводность, температуропроводность, теплоемкость, плотность и др.)

$$\mathcal{V}_{\text{св}} = \{V_s^{\text{св}}, s = 1, \dots, k\}; \quad (1.1)$$

– множество требований к геометрическим размерам ИМ

$$\mathcal{V}_{\text{тр}} = \{V_{\text{н}}^{\text{тр}}, V_{\text{м}}^{\text{тр}}, V_{\text{ф}}^{\text{тр}}\}; \quad (1.2)$$

здесь  $V_{\text{н}}^{\text{тр}}$  – нормальные размеры ИМ;  $V_{\text{м}}^{\text{тр}}$  – малые размеры ИМ;  $V_{\text{ф}}^{\text{тр}}$  – форма ИМ;

– множество сведений о дестабилизирующих факторах

$$\mathcal{V}_{\text{ДФ}} = \{V_{\text{н}}^{\text{ДФ}}, V_{\text{ср}}^{\text{ДФ}}, V_{\text{в}}^{\text{ДФ}}\}, \quad (1.3)$$

где  $V_{\text{н}}^{\text{ДФ}}$  – низкий уровень ДФ;  $V_{\text{ср}}^{\text{ДФ}}$  – средний уровень ДФ;  $V_{\text{в}}^{\text{ДФ}}$  – высокий уровень ДФ;

– множество уровней определенности (достоверности) информации об ИМ

$$\mathcal{V}_{\text{опр}} = \{V_{\text{дет}}, V_{\text{неопр}}, V_{\text{неч}}\}; \quad (1.4)$$

здесь  $V_{\text{дет}}$  – детерминированная информация;  $V_{\text{неопр}}$  – неопределенная информация;  $V_{\text{неч}}$  – нечеткая информация;

– множество методов, которые могут быть, использованы ИИС (импульсные методы с линейным и плоским нагревателями, метод с плоским нагревателем и постоянным нагревом)

$$\mathcal{V}_{\text{М}} = \{V_i^{\text{М}}, i = 1, \dots, k\}, \quad (1.5)$$

здесь  $M_i$  –  $i$ -й метод контроля.

На основе конкретизации данных (1.1)–(1.4) требуется определить метод контроля  $M_{M_i} \in \mathcal{V}_{\text{М}}$ , соответствующий этим данным.

Данная общая задача включает ряд частных задач: разработка структуры множества измерительных ситуаций  $\mathcal{H}$ , построение модели «измерительная ситуация – метод контроля» (ИС – МК), идентификация измерительной ситуации и выбор метода контроля. Первые две задачи решаются в процессе разработки базы знаний ИИИС, две вторые – непосредственно перед проведением измерений.

Множество  $\mathcal{H}$  формируется с использованием декартова произведения множеств (1.1)–(1.4), т.е.

$$\mathcal{H} = \mathcal{V}_{\text{св}} \times \mathcal{V}_{\text{тр}} \times \mathcal{V}_{\text{ДФ}} \times \mathcal{V}_{\text{опр}} = \{h_{i,j,n,m}, i = \overline{1,k}; j \in \{\text{н, м, ф}\}, n \in \{\text{н, ср, в}\}, m \in \{\text{дет, неопр, неч}\}\}. \quad (1.6)$$

По существу элементами  $h_{i,j,n,m}$  множества  $\mathcal{H}$  являются измерительные ситуации, задаваемые кортежами длины четыре

$$h_{i,j,n,m} = \langle \mathcal{V}_i^{\text{св}} \times \mathcal{V}_j^{\text{тр}} \times \mathcal{V}_n^{\text{ДФ}} \times \mathcal{V}_m^{\text{опр}} \rangle. \quad (1.7)$$

Следует заметить, что в процессе эксплуатации ИИИС множество (1.6) может корректироваться как вследствие изменения номенклатуры множеств (1.1) – (1.5), так и состава этих множеств.

Построение модели ИС – МК предполагает выделение в множестве  $\mathcal{H}$   $k$ -подмножеств  $H_i, i = \overline{1,k}$  таких, что для них выполняются условия:

– пересечение любой пары подмножеств  $H_i \subset \mathcal{H}, H_j \subset \mathcal{H}$  есть пустое множество, т.е.

$$H_i \cap H_j = \emptyset, i, j = \overline{1,k}, i \neq j; \quad (1.8)$$

– любая измерительная ситуация  $h_{i,j,n,m}$  является элементом одного из подмножеств  $H_i, i = \overline{1,k}$ , т.е.

$$\bigcap_{i=1}^k H_i = \mathcal{H}; \quad (1.9)$$

– для каждого подмножества  $H_i$  целесообразно использовать один конкретный метод контроля  $V_i^M$ .

Условия (1.8), (1.9) означают, что решается задача разбиения множества  $\mathcal{H}$  на  $k$  непересекающихся подмножеств.

Важная особенность этой частной задачи заключается в следующем. В реальных ситуациях может оказаться, что для какого-нибудь из множеств (1.1) – (1.4) невозможно будет выделить один единственный элемент. Например, в множестве  $\mathcal{V}_{\text{ДФ}}$  часть дестабилизирующих факторов относится к категории  $V_{\text{н}}^{\text{ДФ}}$ , а другая – к  $V_{\text{ср}}^{\text{ДФ}}$ . В этом случае  $\mathcal{V}_{\text{ДФ}}$  дополняется еще одним элементом  $V_{\text{н.ср}}^{\text{ДФ}}$ .

В результате такого разделения множества  $\mathcal{H}$  разрабатывается модель ИС – МК в форме системы процедурных правил:

- ЕСЛИ  $h_{i,j,n,m} \in H_1$ , ТО использовать метод контроля  $V_1^M$ ,
- . . .
- . . .
- . . .

$$(1.10)$$

- ЕСЛИ  $h_{i,j,n,m} \in H_k$ , ТО использовать метод контроля  $V_k^M$ .

При решении задачи разбиения и формирования системы правил (1.10) могут использоваться различные критерии – погрешность измерения, быстрдействие, комплексные показатели. Поэтому в базе знаний (БЗ) содержится информация для различных вариантов решения задачи разбиения. Наличие этой информации позволяет оперативно определять целесообразный метод контроля в процессе эксплуатации ИИИС.

Примеры решения сформулированной задачи выбора метода контроля даны для ИИИС НК ТФСМ в третьей главе.

Наряду с общей задачей выбора метода контроля при проектировании ИИС СМ решаются следующие задачи:

- формирование группы (набора) методов для БЗ ИИИС без учета имеющихся в составе системы измерительных зондов (задача ФМ1);
- формирование группы методов для БЗ ИИИС с учетом содержащихся в системе измерительных зондов (задача ФМ2).

Задача ФМ1 формулируется следующим образом.

На основе известной информации об исследуемых материалах (1.1), (1.2), условиях измерений (1.3), имеющихся в распоряжении проектиров-

щика методов (1.5), допустимых значений погрешности измерения  $\Delta Y_{\text{доп}}$  и быстродействия  $\Delta T_{\text{доп}}$ , требуется сформировать подмножество  $\mathcal{V}_M^1 \subseteq \mathcal{V}_M$ , которое обеспечит выполнение ограничений на показатели точности и быстродействия свойств материалов, т.е.

$$\Delta Y(\mathcal{V}_M^1/\mathcal{V}_{\text{св}}, \mathcal{V}_{\text{тр}}, \mathcal{V}_{\text{ДФ}}) \leq \Delta Y_{\text{доп}}; \quad (1.11)$$

$$\Delta T(\mathcal{V}_M^1/\mathcal{V}_{\text{св}}, \mathcal{V}_{\text{тр}}, \mathcal{V}_{\text{ДФ}}) \leq \Delta T_{\text{доп}}; \quad (1.12)$$

здесь  $\Delta Y(\mathcal{V}_M^1/\mathcal{V}_{\text{св}}, \mathcal{V}_{\text{тр}}, \mathcal{V}_{\text{ДФ}})$ ,  $\Delta T(\mathcal{V}_M^1/\mathcal{V}_{\text{св}}, \mathcal{V}_{\text{тр}}, \mathcal{V}_{\text{ДФ}})$  – соответственно погрешность и быстродействие, которые обеспечиваются группой методов  $\mathcal{V}_M^1$  при возможных  $\mathcal{V}_{\text{св}}$ ,  $\mathcal{V}_{\text{тр}}$  и  $\mathcal{V}_{\text{ДФ}}$ .

Задача ФМ2 отличается от задачи ФМ1 тем, что накладывается дополнительное ограничение на число используемых ИИС измерительных зондов  $N_{\text{из}}$ . В этом случае в неравенствах (1.11), (1.12) погрешность и быстродействие записываются в виде

$$\Delta Y(\mathcal{V}_M^1/\mathcal{V}_{\text{св}}, \mathcal{V}_{\text{тр}}, \mathcal{V}_{\text{ДФ}}, N_{\text{из}}); \quad \Delta T(\mathcal{V}_M^1/\mathcal{V}_{\text{св}}, \mathcal{V}_{\text{тр}}, \mathcal{V}_{\text{ДФ}}, N_{\text{из}}).$$

Следует заметить, что в рассмотренных задачах выбора метода и формирования группы методов под элементом  $V_i^M \in \mathcal{V}_M$  понимается метод определения свойств материалов в широком смысле. Составляющими этого метода являются, во-первых, некоторый физический способ, заключающийся в воздействии на исследуемый материал и получение данных о свойствах на основе известных фундаментальных законов, во-вторых, метод обработки измерительной информации с целью повышения точности и достоверности определяемых параметров.

## 1.2. МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ПРЕДМЕТНОЙ ОБЛАСТИ И ИССЛЕДУЕМЫХ МАТЕРИАЛОВ

**Математическая модель предметной области.** Предметная область (ПО) представляет собой совокупность признаков, характеризующих область экспертизы. Предметная область характеризует: объекты измерения (физические величины и параметры), математические модели, методы и алгоритмы, составляющие математический аппарат современной метрологии; процесс измерения и его метрологическое обеспечение [1]. В данной работе предметную область составляют исследуемые материалы: теплоизоляционные, полимерные, строительные, а также информационно-измерительные системы для неразрушающего контроля качественных свойств материалов, их математическое, алгоритмическое и метрологическое обеспечение.

В зависимости от уровня достоверности информации об ИМ различают задачи контроля СМ при детерминированных данных, в условиях неопределенности (случайные величины и процессы) и в условиях нечеткости (ненадежные данные, плохо определенные материалы).

Классификация задач проводится по следующим признакам: определяемые свойства, уровень априорной информации, требования к точности решаемых задач. По типу измеряемых свойств (по исследуемым материалам) определены следующие задачи: измерение физической величины, зависящей от параметров (косвенные, совокупные, статические), определение интегральных свойств, определение характеристик объектов при воздействии дестабилизирующих факторов.

Определяемые параметры исследуемых свойств имеют следующие характеристики: диапазон измерений (низкий, средний, высокий), зависимость от ДФ, структура (твердое тело), область применения (приборостроение, строительство, машиностроение и др.)

Математическое моделирование процесса контроля качественных свойств и разработки ИИИС включает процедуру составления модели предметной области исследования. Разработка модели для широкого диапазона определения качественных свойств, например от теплоизоляционных материалов до металлов, является весьма сложной проблемой, так как при контроле и измерении свойств для всех классов известных материалов трудно обеспечить допустимую погрешность измерений, установленную

соответствующей нормативной технической документацией. Поэтому необходимо разработать математическую модель предметной области, огибающую область определяемых параметров свойств материалов, диапазоны параметров свойств исследуемых материалов, входные и выходные данные.

Математическая модель предметной области служит основой для разработки интеллектуальной информационно-измерительной системы и классификации исследуемых материалов.

Математическая модель предметной области (ПО)  $M_{ПО}$ , характеризующая общую информацию об ИИС и ИМ, записывается в виде кортежа [2]

$$M_{ПО} = \langle \mathcal{U}, \mathcal{D}, \mathcal{V}_M, \mathcal{V}_{ИЯ}, \mathcal{V}_{ДФ}, \mathcal{J}_{ИП} \rangle,$$

где  $\mathcal{U}$  – множество определяемых параметров ИМ;  $\mathcal{D}$  – множество интервалов (диапазонов) измеряемых параметров;  $\mathcal{V}_M$  – множество используемых методов измерения;  $\mathcal{V}_{ИЯ}$  – множество используемых измерительных ячеек (ИЯ);  $\mathcal{V}_{ДФ}$  – множество ДФ;  $\mathcal{J}_{ИП}$  – объем информации, получаемый пользователем (ИП).

В результате интеллектуализации ИИС модель предметной области дополняется новыми компонентами и принимает вид

$$M_{ПО}^И = \langle \mathcal{U}, \mathcal{D}, \mathcal{K}^И, \mathcal{V}_M^И, \mathcal{V}_{ИЯ}^И, \mathcal{V}_{ДФ}^И, \mathcal{J}_{ИП}^И, \mathcal{V}_{ИИ}, \mathcal{V}_3^И, \mu_{f_k} \rangle;$$

здесь  $\mathcal{K}^И$  – множество классов ИМ;  $\mathcal{V}_{ИИ}^И$  – множество методов искусственного интеллекта (ИИ);  $\mathcal{V}_3^И$  – множество задач, решаемых методами ИИ с использованием базы знаний;  $\mu_{f_k}$  – функции принадлежности нечетких множеств. Верхним индексом «и» отмечены компоненты, которые могут развиваться (расширяться) за счет наличия базы знаний.

При выборе метода измерения используются результаты решения задачи классификации ИМ и распознавания образов.

**Математическая модель исследуемых материалов.** В информационно-измерительных системах применяются традиционные подходы и методы НК ТФСМ, способы обработки полученной информации и метрологического анализа результатов измерения. Однако такие методы имеют ограниченные возможности, в частности, при решении плохо формализуемых, некорректных и условно корректных задач. Примерами подобных задач являются плохо структурированные алгоритмы нечеткой логики, мягких вычислений и измерений, решений в условиях априорной неопределенности. Интеллектуальные измерения и обработка данных НК теплофизических свойств материалов (ТФСМ) приводят к необходимости решения задачи выбора одной из набора возможных гипотез о модели изучаемого объекта и оцениванию параметров этой модели.

Математическая модель исследуемого материала должна отражать уровни определенности информации (детерминированность, неопределенность, нечеткость), применяемые методы НК, определяемые параметры ИМ, диапазоны значений параметров ИМ, структуры ИМ, требования к геометрическим размерам исследуемых материалов, дестабилизирующие факторы, воздействующие на ИМ, требования к точности ИМ.

Математическая модель ИМ может быть представлена в виде следующего кортежа:

$$M_{ИМ} = \langle \mathcal{V}_M, \mathcal{U}_П, \mathcal{D}_q, \Psi, \mathcal{V}_{ДФ}, \mathcal{V}_{тр}, \mathcal{V}_{опр}, \mu_{f_k}, \mathcal{S} \rangle,$$

где  $\mathcal{V}_M = \{V_{Mi}, i = 1, \dots, k\}$  – множество используемых в ИИС методов НК;  $\mathcal{U}_П = \{U_i, i = 1, \dots, m\}$  – множество параметров ИМ;  $\mathcal{D}_q = \{d_{qi}, i = 1, \dots, v\}$  – множество диапазонов  $q$ ;  $\Psi = \{\Psi_i, i = 1, \dots, n\}$  – множество структур ИМ;  $\mathcal{V}_{ДФ} = \{V_{ДФi}, i = 1, \dots, \beta\}$  – множество ДФ, воздействующих на ИМ;  $\mathcal{V}_{тр}$  – множество требований к геометрическим размерам  $\mathcal{V}_{тр} = \{V_n, V_m, V_\phi\}$  (здесь  $V_n$  – нормальные размеры ИМ;  $V_m$  – малые размеры ИМ;  $V_\phi$  – форма ИМ);  $\mathcal{V}_{опр}$  – множество уровней определенности ин-

формации об ИМ  $\mathcal{V}_{\text{опр}} = \{V_{\text{дет}}, V_{\text{неопр}}, V_{\text{неч}}\}$  (здесь  $V_{\text{дет}}$  – детерминированная информация;  $V_{\text{неопр}}$  – неопределенная информация;  $V_{\text{неч}}$  – нечеткая информация);  $\mu_{f_k}$  – функции принадлежности нечетких множеств;  $\mathcal{S} = \{S_i, i = 1, \dots, \xi\}$  – требования к точности результатов измерения свойств материалов.

Предлагаемая математическая модель исследуемых материалов в виде кортежа, в которой множества параметров и переменных достаточно полно отражают физическое состояние ИМ, измерительную ситуацию, позволяет применить данную модель в базе знаний интеллектуальной информационно-измерительной системы НК ТФСМ и определять параметры, характеризующие теплофизические свойства твердых материалов, с прогнозируемой допустимой погрешностью.

### 1.3. ЗАДАЧИ КЛАССИФИКАЦИИ ИССЛЕДУЕМЫХ МАТЕРИАЛОВ

Классификация ИМ включает процедуру выделения множества всех возможных исследуемых материалов неразрушающего контроля. Множества ИМ разбиваются на подмножества в соответствии с критериями и параметрами, которыми они описываются. При этом параметры ИМ могут задаваться априорно или определяться экспериментальным путем по тестовым измерениям перед началом контроля качественных свойств материалов на основе тестового измерительного эксперимента (ТИЭ), который представляет собой совокупность функций измерения и обработки данных тестовых измерений свойств ИМ.

При разработке модели ИМ необходимо описать и классифицировать параметры и свойства, характеризующие исследуемые материалы, влияющие на процесс измерения, установить связи между ними и пределы изменения в различных измерительных ситуациях, определить меру близости объектов, функции потерь и вероятности неправильной классификации. Потенциальная эффективность классификации анализируемых исследуемых материалов и их параметров необходима для создания адекватной ММ и проведения идентификации ИМ на основе этой модели.

Классификация ИМ проводится с целью определения класса ИМ и, соответственно, измерительной ситуации и измерительной процедуры: метода измерения, мощности теплового воздействия и т.д., а также определения функции потерь и вероятности неправильной классификации.

Проблема классификации материалов заключается в том, чтобы всю анализируемую совокупность исследуемых материалов  $\mathcal{O} = \{O_i, i = 1, \dots, N\}$ , статистически представленную в виде матрицы  $\mathcal{O}$ , разбить на однородные классы.

Для формализации этой проблемы удобно интерпретировать ИМ в качестве точек в соответствующем признаковом пространстве [168]. Если исходные данные представлены в форме матрицы  $\mathcal{O}$ , то эти точки являются геометрическим изображением многомерных наблюдений  $\mathcal{O}_1, \mathcal{O}_2, \dots, \mathcal{O}_N$  в  $p$ -мерном пространстве  $P^p(\mathcal{O})$  с координатными осями  $\mathcal{O}^{(1)}, \mathcal{O}^{(2)}, \dots, \mathcal{O}^{(p)}$ .

Геометрическая близость двух или нескольких точек в этом пространстве означает близость «физических» свойств ИМ, их однородность. Тогда классификация состоит в разбиении анализируемой совокупности точек на классы таким образом, чтобы ИМ, принадлежащие одному классу, находились на небольших расстояниях друг от друга. Полученные в результате разбиения совокупности  $\mathcal{O}$  классы называют кластерами (таксонами, образами), а методы их нахождения соответственно кластерным анализом, распознаванием образов с самообучением.

Однородность исследуемых материалов определяется заданием правила вычисления величины  $p_{ij}$ , характеризующей или разность в определяемом параметре  $d(O_i, O_j)$  между ИМ  $O_i$  и  $O_j$  из исследуемой

совокупности  $O(i, j = 1, \dots, N)$ , или степень близости (сходства)  $r(O_i, O_j)$  тех же ИМ. Если задана величина  $d(O_i, O_j)$ , то близкие в смысле этой метрики ИМ, считаются однородными, принадлежащими к одному классу. При этом необходимо сравнение  $d(O_i, O_j)$  с заданным пороговым значением.

Например, в рассматриваемых ИМ, приведенных в табл. 1.1, при НК ТФСМ одним из определяемых параметров является теплопроводность  $\lambda$  и  $\lambda_{\text{пор}}$  целесообразно задать следующим образом:

$$0,02 < \lambda_{\text{пор},1} < 0,03 \text{ Вт/(м·К)}; \quad 0,31 < \lambda_{\text{пор},2} < 0,8 \text{ Вт/(м·К)};$$

$$0,81 < \lambda_{\text{пор},3} < 1,0 \text{ Вт/(м·К)}.$$

При проведении измерений по определению качественных свойств материалов выполняется идентификация измерительной ситуации. Для этого необходимо решить задачи классификации исследуемых материалов и распознавания образов.

### 1.3.1. Постановка задачи классификации исследуемых материалов

Исходные данные о исследуемых материалах – априорную информацию и первичную измерительную информацию можно представить в виде матрицы следующим образом

$$O = \begin{pmatrix} q_{11}^{(d_1)}, q_{12}^{(d_2)}, \dots, q_{1m}^{(d_m)} \\ q_{21}^{(d_1)}, q_{22}^{(d_2)}, \dots, q_{2m}^{(d_m)} \\ \dots \\ q_{N1}^{(d_1)}, q_{N2}^{(d_2)}, \dots, q_{Nm}^{(d_m)} \end{pmatrix},$$

где  $N$  – число ИМ;  $q_i$  – ( $i = 1, \dots, N$ ) рассматриваемый параметр (признак) качественных свойств материалов;  $d_i$  – ( $i = 1, \dots, m$ ) диапазоны параметров свойств ИМ.

Задача классификации исследуемых материалов формулируется следующим образом. Для задаваемого множества ИМ

$$O = \{O_i, i = 1, \dots, N\},$$

каждый ИМ которого характеризуется  $m$ -параметрами, т.е.  $O_i = (q_{i1}, q_{i2}, \dots, q_{im})$ , а также числа классов ИМ  $k$  и интервалов значений каждого параметра по  $k$ -классам,  $[q_{ls}^H, q_{ls}^B]$ ,  $l = 1, \dots, m$ ,  $s = 1, \dots, k$ , требуется закрепить ИМ  $O_i \in O$  за конкретным классом  $K_1, K_2, \dots, K_k$ .

### 1.3.2. Алгоритм решения задачи классификации

Алгоритм решения задачи классификации включает следующие этапы.

1. Эксперт назначает  $k$  ИМ – представителей классов  $O_1, O_2, \dots, O_k$ .
2. Рассчитываются пороговые значения взвешенного евклидова расстояния для каждого класса, т.е.

$$d_{\text{пор}}^s = \sqrt{\sum_{l=1}^m v_{ls} (q_{ls}^B - q_{ls}^H)^2}, \quad v_{ls} = \left( \frac{q_{ls}^B - q_{ls}^H}{2} \right)^{-2}, \quad s = 1, \dots, k.$$

3. Классификация с использованием последовательного расчета расстояний между ИМ и представителями классов выполняется автоматически. Если взвешенное евклидово расстояние не превышает  $d_{\text{пор}}^s$ , то ИМ относится к соответствующему классу, т.е. при

$$d(O_i, O_s) = \sqrt{\sum_{l=1}^m v_{ls} (q_{li} - \bar{q}_{ls})^2} \leq d_{\text{пор}}^s, \text{ то } O_i \in K_s.$$

4. В случае, если  $\forall s \in \{1, 2, \dots, k\}: d(O_i, O_s) > d_{\text{пор}}^s$ , то формируется новый класс с  $O_{k+1} = O_i$ .

5. Строятся функции принадлежности нечетких множеств по признакам и классам, т.е.  $\mu_{l,s}, l = 1, \dots, m, s = 1, \dots, k$ .

#### ***Классификация исследуемых материалов при контроле ТФСМ.***

***Характеристика исследуемых материалов.*** Основными параметрами, характеризующими теплофизические свойства материалов, является: коэффициент теплопроводности  $\lambda$ , коэффициент температуропроводности  $a$ , удельная теплоемкость  $C$ , связанные между собой соотношением  $\lambda = a C \rho$ , где  $\rho$  – плотность материала. Коэффициент теплопроводности отражает внутренний перенос тепла в материале. Удельная теплоемкость указывает на величину аккумуляции тепла в материале. Коэффициент температуропроводности определяет инерционные свойства тепла при теплообмене [3].

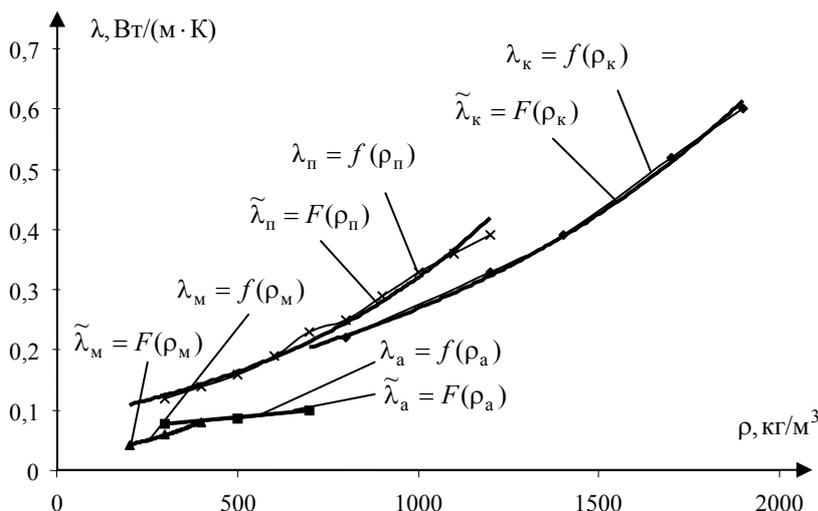
Теплофизические свойства материалов в большей или меньшей мере зависят от действующих дестабилизирующих факторов: температуры, влажности и др. (см. раздел 3.1 монографии). Например, как показывают экспериментальные исследования, при увеличении влажности от 0 до 40 % возрастает теплопроводность исследуемых материалов: рипора, минваты, войлока, дерева. С ростом температуры от 0 до 60 °С коэффициент теплопроводности теплоизоляционных материалов (минваты, линолеума, войлока, пенопласта) увеличивается (рис. 3.7); при изменении температуры от 0 до –60 °С коэффициент теплопроводности теплоизоляционных материалов уменьшается; у полиметилметакрилата при увеличении температуры теплопроводность уменьшается. Приблизительно эти зависимости линейные. Теплопроводность полиэтилена низкой и высокой плотности при увеличении температуры от 0 до 200

°С теплопроводность уменьшается.

Для получения достоверных теплофизических свойств необходимо, чтобы в применяемых методах ИМ подвергались незначительным тепловым воздействиям, т.е. чтобы в материале не возникали большие температурные градиенты. Только при таких условиях не будет заметного изменения структурно-механических и теплофизических свойств исследуемых материалов. Поэтому методы для определения ТФС теплоизоляционных материалов, должны соответствовать следующим требованиям: кратковременность эксперимента и теплового воздействия, определение ТФСМ из одного эксперимента.

ТФС изоляционных материалов значительно зависят от плотности ИМ. Удельная теплоемкость ИМ мало зависит от плотности материала, а коэффициенты теплопроводности и температуропроводности с возрастанием плотности материала увеличиваются [3]. В качестве примера на рис. 1.1 приведены зависимости теплопроводности от плотности ( $\rho$ ) ряда исследуемых материалов: минваты [ $\lambda_m = f(\rho_m)$ ], пенобетона [ $\lambda_{п} = f(\rho_{п})$ ], строительного кирпича [ $\lambda_k = f(\rho_k)$ ], асбеста [ $\lambda_a = f(\rho_a)$ ].

Для полученных зависимостей определены аппроксимирующие функции, которые используются в базе знаний ИИИС для коррекции результатов НК ТФСМ:  $\tilde{\lambda}_k = F(\rho_k) = 0,1076e^{0,0009\rho_k}$ ;  $\tilde{\lambda}_a = F(\rho_a) = 0,0642e^{0,0006\rho_a}$ ;  $\tilde{\lambda}_m = F(\rho_m) = 0,0223e^{0,0032\rho_m}$ ;  $\tilde{\lambda}_{п} = F(\rho_{п}) = 0,08535e^{0,0013\rho_{п}}$ .



**Рис. 1.1. Зависимости теплопроводности ИМ от плотности и аппроксимирующие функции**

Кроме того, получены зависимости теплопроводности ИМ от ше-

роховатости ( $\psi$ ), контактного сопротивления ( $R_T$ ) и соответствующие аппроксимирующие функции (см. 3 главу).

Математические модели исследуемых материалов позволяют учитывать вышеперечисленные параметры, характеризующие ИМ, а также диапазоны их изменения при воздействии ДФ.

Определение ТФС изоляционных материалов с помощью ИИИС осуществляется в диапазоне теплопроводности от 0,02 до 1 Вт/(м·К). В этот диапазон входят теплоизоляционные, полимерные и строительные материалы. Теплофизические свойства указанных материалов, измеренные предлагаемой ИИИС и приведенные из литературных источников при известных значениях влажности, плотности и температуры, представлены в табл. 1.1 [3 – 9].

Для классификации ИМ необходимо классифицировать априорную информацию (АИМ) о ИМ ( $\rho$ ,  $\psi$ ,  $R_T$ ) и первичную измерительную информацию об исследуемом материале (ПИМ) ( $\lambda$ ,  $a$ ,  $C$ ,  $T$ ). При этом следует разбить все имеющиеся в распоряжении данные (табл. 1.1) об ИМ на однородные классы, характеризующиеся подобными измерительными ситуациями, что позволит применить одну и ту же измерительную процедуру для всех ИМ рассматриваемого класса.

### 1.1. Теплофизические свойства материалов, измеренные при известных значениях влажности, плотности и температуры

Материалы	$\lambda$ , Вт/(м ·К)	$a \cdot 10^{-7}$ , м <sup>2</sup> /с	$C$ , ккал/(кг ·°С)	$W$ , %	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$T$ , °С
1. Рипор	0,028	4,61	0,15	0	30	20
2. Пластмасса полихлорвиниловая	0,03	13,1	0,56	10	50	20
3. Резина пористая	0,036	8,16	0,33	10	160	20
4. Пенопласт полистирольный	0,038	7,28	–	15	–	25
5. Стекланная вата	0,039	9,7	0,16	10	75	30
6. Пробковая плита	0,04	3,31	0,45	сухая	390	20
7. Минвата полужесткая	0,04	3,93	0,16	10	300	20
8. Винилискожа-НТ	0,05	1,6	–	15	–	25
9. Шерстяной войлок	0,08	4,65	0,45	0	150	20

10. Линолеум на основе	0,081	1,15	–	10	900	25
11. Минераловатная плита жесткая	0,086	12,9	0,18	10	400	20
12. Газобетон	0,09	10,8	–	20	700	20
13. Фанера клееная	0,11	3,61	0,6	сухая	600	20
14. Пеностекло	0,12	14	0,2	2,5	50	20
15. Древесно-волокнистая плита	0,12	3,9	0,6	15	600	20
16. Кожа	0,12	4,1	0,34	0	1000	30
17. Эбонит	0,12	3,43	0,34	0	1200	20
18. Пемза	0,13	–	–	0	600	20
19. Картон плотный	0,13	6,1	0,35	–	700	25
20. Рубероид	0,13	7,1	0,35	–	600	20
21. Линолеум	0,14	3,2	0,45	–	1100	30
22. Полиэтилен низкого давления	0,16	1,55	–	0	940	25
23. Асбест	0,17	10	0,3	12,8	670	25
24. Пенобетон	0,19	0,29	0,33	77,5	520	14

Продолжение табл. 1.1

Материалы	$\lambda$ , Вт/( м·К)	$\alpha \cdot 10^{-7}$ , м <sup>2</sup> /с	$C$ , ккал/(кг· °С)	$W$ , %	$\rho$ , кг /м <sup>3</sup>	$T$ , °С
25. Полипропилен	0,19	–	0,25	0	850	30
26. Полиметил-метакрилат	0,195	1,09	0,42	0	1180	20

					0	
					1	
27. Гетинакс		3,4			2	
	0,25	1	0,20	0	5	2
					0	0
28. Фторопласт		1,1			1	
	0,26	5	0,23	0	3	
					0	2
29. Газосиликат				1	8	2
	0,26	3,8	–	0	0	5
30. Кирпич красный		15,			1	
	0,33	1	0,21	–	2	
					0	2
31. Полиэтилен высокого давления		0,6			9	
	0,36	8	–	0	1	2
					0	5
32. Шлакобетон		20,			1	
	0,39	8	0,18	–	2	
					0	2
33. Мел		14,			1	
	0,51	15	0,219	–	7	
					8	2
					0	0
34. Бетон		1,5			2	
	0,54	8	0,321	–	2	
					0	2
					0	0

35. Кирпич силикатный	0,6	18,4	0,2	1	1900	20
36. Стекло	0,629	3,6	–	20	1950	20
37. Асфальтобетон	0,77	10,7	0,4	–	2100	20
38. Цемент	0,8	0,86	–	–	2000	20
39. Мрамор	0,96	41,3	0,1	0	2700	90
40. Кварц	1,01	3,89	–	0	2210	20

Априорную и первичную информацию об ИМ –  $\lambda, a, c, p, \psi, R_T, T, W$ , с указанием их возможных диапазонов, можно представить в виде матрицы. Представление информации подобным образом в базе знаний ИИИС обеспечивает удобство извлечения необходимой информации об ИМ.

Матрица, отражающая рассматриваемые материалы, а также их теплофизические свойства и параметры, представлена в виде

$$O = \begin{pmatrix} \lambda_1^{(d_\lambda)}, a_1^{(d_a)}, C_1^{(d_C)}, \rho_1^{(d_\rho)}, \psi_1^{(d_\psi)}, R_{T1}^{(d_{RT})}, T_1^{(d_T)}, W_1^{(d_W)} \\ \lambda_2^{(d_\lambda)}, a_2^{(d_a)}, C_2^{(d_C)}, \rho_2^{(d_\rho)}, \psi_2^{(d_\psi)}, R_{T2}^{(d_{RT})}, T_2^{(d_T)}, W_2^{(d_W)} \\ \dots \\ \lambda_N^{(d_\lambda)}, a_N^{(d_a)}, C_N^{(d_C)}, \rho_N^{(d_\rho)}, \psi_N^{(d_\psi)}, R_{TN}^{(d_{RT})}, T_N^{(d_T)}, W_N^{(d_W)} \end{pmatrix},$$

где  $N$  – число рассматриваемых материалов;  $d_\lambda, d_a, d_C, d_\rho, d_\psi, d_{RT}, d_T, d_W$  – соответственно диапазоны определения  $\lambda, a, C, \rho, \psi, R_T, T, W$ .

В матрице первичной информации об ИМ записаны значения  $\lambda(1, \dots, N)$  для каждого диапазона:

$$\lambda = \begin{pmatrix} \lambda_1^{(1)}(T) & \lambda_1^{(2)}(T) & \dots & \lambda_1^{(d)}(T) \\ \lambda_2^{(1)}(T) & \lambda_2^{(2)}(T) & \dots & \lambda_2^{(d)}(T) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \lambda_N^{(1)}(T) & \lambda_N^{(2)}(T) & \dots & \lambda_N^{(pd)}(T) \end{pmatrix},$$

где  $\lambda_i^{(j)}(T)$  – значение  $j$ -го диапазона теплопроводности, к которому относится рассматриваемый объект;  $d$  – число диапазонов теплопроводности ИМ.

Матрица значений температуропроводности  $a$  для всех диапазонов

$$A = \begin{pmatrix} a_1^{(1)} & a_1^{(2)} & \dots & a_1^{(d)} \\ a_2^{(1)} & a_2^{(2)} & \dots & a_2^{(d)} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_N^{(1)} & a_N^{(2)} & \dots & a_N^{(d)} \end{pmatrix},$$

где  $a_i^{(j)}$  – значение  $j$ -го диапазона ( $d$ ) температуропроводности ИМ.

Матрица величин теплоемкости  $C$  рассматриваемых поддиапазонов

$$C = \begin{pmatrix} C_1^{(1)} & C_1^{(2)} & \dots & C_1^{(d)} \\ C_2^{(1)} & C_2^{(2)} & \dots & C_2^{(d)} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ C_N^{(1)} & C_N^{(2)} & \dots & C_N^{(d)} \end{pmatrix},$$

где  $C_i^{(j)}$  – значение  $j$ -го диапазона ( $p$ ) теплоемкости ИМ.

Матрица априорной информации о плотности  $\rho$  для заданных поддиапазонов

$$\rho = \begin{pmatrix} \rho_1^{(1)} & \rho_1^{(2)} & \dots & \rho_1^{(d)} \\ \rho_2^{(1)} & \rho_2^{(2)} & \dots & \rho_2^{(d)} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \rho_N^{(1)} & \rho_N^{(2)} & \dots & \rho_N^{(d)} \end{pmatrix},$$

где  $\rho_i^{(j)}$  – значение  $j$ -го диапазона ( $d$ ) плотности ИМ.

Матрица априорной информации о шероховатости  $\psi$  ИМ для рассматриваемых поддиапазонов

$$\psi = \begin{pmatrix} \psi_1^{(1)} & \psi_1^{(2)} & \dots & \psi_1^{(d)} \\ \psi_2^{(1)} & \psi_2^{(2)} & \dots & \psi_2^{(d)} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \psi_N^{(1)} & \psi_N^{(2)} & \dots & \psi_N^{(d)} \end{pmatrix},$$

где  $\psi_i^{(j)}$  – значение  $j$ -го диапазона ( $d$ ) шероховатости ИМ.

Матрица величин контактного сопротивления  $R_T$  для заданных поддиапазонов

$$R_T = \begin{pmatrix} R_{T1}^{(1)} & R_{T1}^{(2)} & \dots & R_{T1}^{(d)} \\ R_{T2}^{(1)} & R_{T2}^{(2)} & \dots & R_{T2}^{(d)} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ R_{TN}^{(1)} & R_{TN}^{(2)} & \dots & R_{TN}^{(d)} \end{pmatrix},$$

где  $R_i^{(j)}$  – значение  $j$ -го диапазона ( $d$ ) контактного сопротивления ИМ.

Матрица значений температуры  $T$  для рассматриваемых поддиапазонов

$$\mathcal{T} = \begin{pmatrix} T_1^{(1)} & T_1^{(2)} & \dots & T_1^{(d)} \\ T_2^{(1)} & T_2^{(2)} & \dots & T_2^{(d)} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ T_N^{(1)} & T_N^{(2)} & \dots & T_N^{(d)} \end{pmatrix},$$

где  $T_i^{(j)}$  – значение  $j$ -го диапазона ( $d$ ) температуры ИМ.

Матрица величин влажности  $\mathcal{W}$  для заданных поддиапазонов

$$\mathcal{W} = \begin{pmatrix} W_{T_1}^{(1)} & W_{T_1}^{(2)} & \dots & W_{T_1}^{(d)} \\ W_{T_2}^{(1)} & W_{T_2}^{(2)} & \dots & W_{T_2}^{(d)} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ W_{T_N}^{(1)} & W_{T_N}^{(2)} & \dots & W_{T_N}^{(d)} \end{pmatrix},$$

где  $W_i^{(j)}$  – значение  $j$ -го диапазона ( $d$ ) влажности ИМ.

Анализ исследуемых материалов, приведенных в табл. 1.1, их параметров, а также диапазонов априорных и измеренных параметров при воздействии ДФ, позволит использовать эту информацию при распределении  $N$ -исследуемых материалов на соответствующее число классов.

**Исходная информация для решения задачи классификации.** В результате анализа характеристик и параметров исследуемых материалов выбирается доминирующий признак ИМ, по которому ИМ можно разбить на однородные классы. При этом учитывается, что каждому классу ИМ будет ставиться в соответствие измерительная ситуация, в том числе метод измерений ТФСМ, измерительная процедура, метод метрологического анализа.

В качестве примера в табл. 1.2 приведена исходная информация для решения задачи классификации. Согласно представленной информации необходимо классифицировать пятнадцать исследуемых материалов ( $N=15$ ) на три класса ( $K=3$ ) по четырем признакам ( $m=4$ ).

В табл. 1.3 представлены четыре основных признака  $m=4$  (свойства и параметры)  $Q_i = (q_{i1}, q_{i2}, \dots, q_{im})$  исследуемых материалов, а также их изменение в интервале с границами «нижнее значение интервала» ( $q_{im}^H$ ) и «верхнее значение интервала» ( $q_{im}^B$ ).

## 1.2. Исходная информация для решения задачи классификации

Исследуемые материалы (см. табл. 1.1)	$\lambda, \text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$	$\alpha \cdot 10^{-7}, \text{м}^2/\text{с}$	$C, \text{ккал}/(\text{кг}\cdot^\circ\text{C})$	$\rho, \text{кг}/\text{м}^3$
1. Рипор	0,028	4,61	0,15	30
7. Минвата	0,04	3,93	0,17	300
16. Кожа	0,12	4,1	0,34	1000
23. Асбест	0,17	10	0,3	670
26. ПММ	0,195	1,09	0,42	1180

27. Гетинакс	0,25	3,41	0,20	1250
28. Газосиликат	0,26	3,8	0,19	380
29. Кирпич красный	0,33	15,1	0,21	1200
32. Шлакобетон	0,39	20,8	0,48	1100
33. Мел	0,51	14,15	0,22	1780
35. Кирпич силикатный	0,6	18,4	0,2	1900
36. Стекло	0,63	13,6	0,23	1400
37. Асфальтобетон	0,77	10,7	0,4	2100
38. Цемент	0,85	29,1	0,53	2000
39. Мрамор	0,96	41,3	0,1	2700

### 1.3. Значения интервалов признаков материалов по классам

Признаки $Q_i = (q_{i1}, q_{i2}, \dots, q_{im})$	Классы ( $s = 1, \dots, k$ )					
	1		2		3	
	нижнее значение интервала (н)	верхнее значение интервала (в)	нижнее значение интервала (н)	верхнее значение интервала (в)	нижнее значение интервала (н)	верхнее значение интервала (в)
1. Теплопроводность, Вт/(м·К)	$q_{11}$	$q_{11}$	$q_{12}$	$q_{12}$	$q_{13}$	$q_{13}$
	0,02	0,3	0,31	0,8	0,81	1,0
2. Температуропроводность, м <sup>2</sup> /с	$q_{21}$	$q_{21}$	$q_{22}$	$q_{22}$	$q_{23}$	$q_{23}$
	1,0	10	10,1	25	25,1	42
3. Теплоемкость, ккал/(кг·°С)	$q_{31}$	$q_{31}$	$q_{32}$	$q_{32}$	$q_{33}$	$q_{33}$
	0,15	0,42	0,20	0,48	0,1	0,6
4. Плотность, кг/м <sup>3</sup>	$q_{41}$	$q_{41}$	$q_{42}$	$q_{42}$	$q_{43}$	$q_{43}$
	30	1250	1100	2100	2000	2700

На основе представленной информации в табл. 1.2 и 1.3 проводится решение задачи классификации ИМ.

**Решение задачи классификации исследуемых материалов.** При решении задачи классификации с использованием информации об ИМ, приведенной в табл. 1.2 и 1.3, в качестве основных признаков при классификации взяты теплопроводность ( $q_1$ ) и температуропроводность ( $q_2$ ).

Пример решения задачи классификации ИМ представлен на рис. 1.2. Исследуемые материалы распределены согласно алгоритму классификации, изложенному в разделе 1.3.2, на три класса. По определенному доминирующему признаку – теплопроводность – к первому классу относятся ИМ с теплопроводностью 0,02...0,2 Вт/(м·К); ко второму классу – 0,031...0,8 Вт/(м·К); к третьему классу – 0,81...1 Вт/(м·К). Определены координаты центров каждого класса  $\Pi_{K_1}$ ,  $\Pi_{K_2}$ ,  $\Pi_{K_3}$ , необходимые в решении задачи распознавания образования образов.

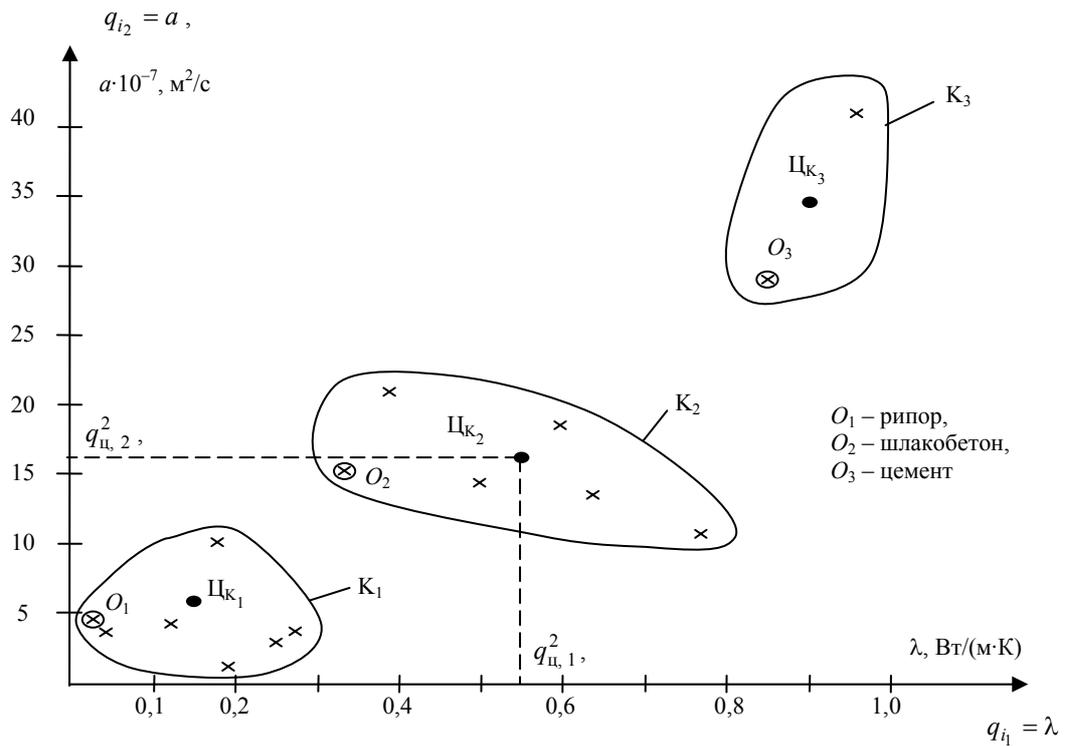


Рис. 1.2. Сечение результатов классификации по двум параметрам ИМ:  
 $a$  – температуропроводность;  $\lambda$  – теплопроводность

Результаты классификации используются в реализации интеллектуальных процедур принятия решений по распознаванию образов и выбору метода контроля ТФСМ.

#### 1.4. РАСПОЗНАВАНИЕ ОБРАЗОВ И АЛГОРИТМ ВЫБОРА МЕТОДА КОНТРОЛЯ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ

**Распознавание образов** при отнесении исследуемых материалов к соответствующему классу для выбранных примеров выполняется двумя способами.

**Способ 1.** Определение евклидова расстояния для ИМ  $O_i$  до центров классов (рис. 1.2)

$$d_E(O_i, O_{\text{ц}}^s) = \sqrt{\sum_{l=1}^m v_l (q_{il} - q_{\text{ц}l}^s)^2},$$

где  $q_{\text{ц}l}^s$  –  $l$ -ая координата центра  $s$ -го класса,  $s = 1, \dots, k$ .

**Способ 2.** Использование функции принадлежности (ФП). Пример использования ФП показан на рис. 1.3 и 1.4.

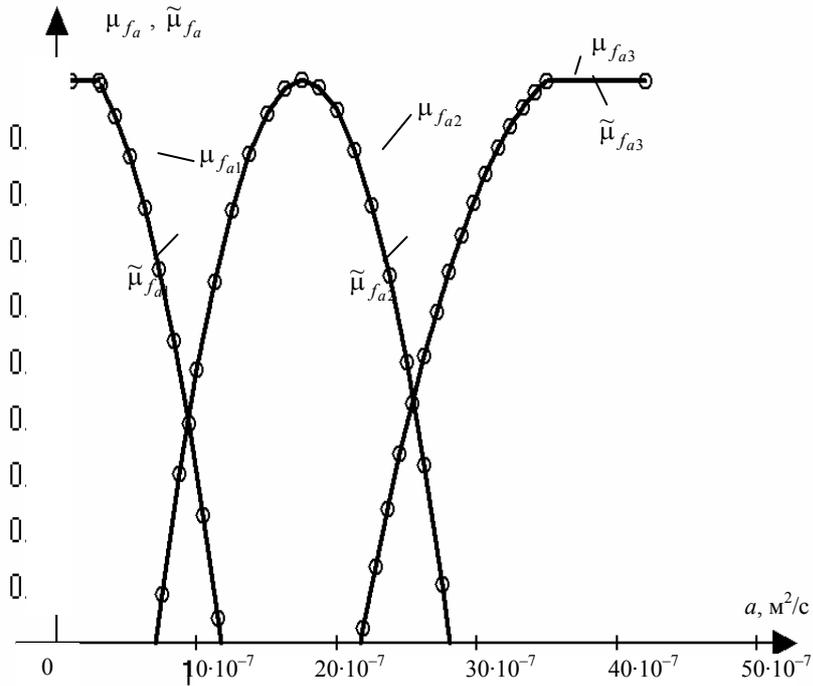


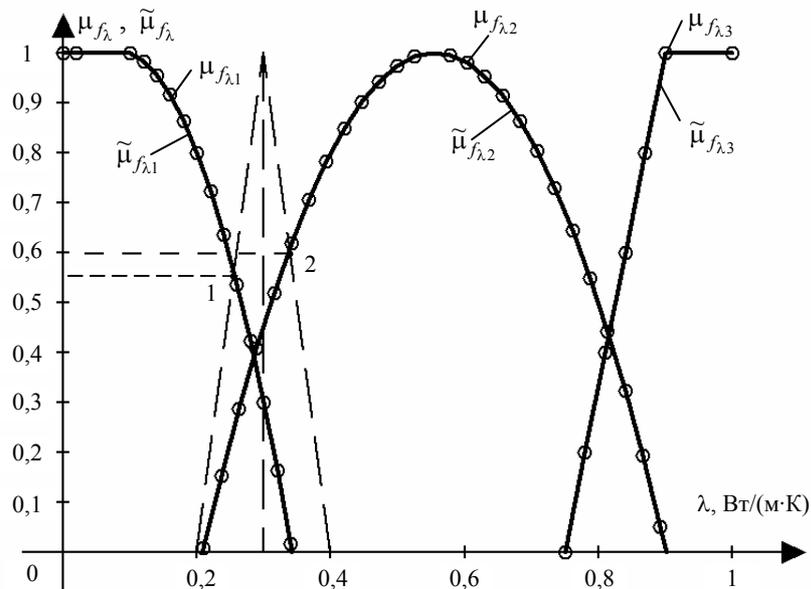
Рис. 1.3. Функции принадлежности нечетких множеств  $\mu_{f_{as}}$

Функции принадлежности нечетких множеств  $\mu_{f_{as}}$ ,  $s=1, \dots, k$  (рис. 1.3):

$$\tilde{\mu}_{f_{a1}}(a) = \begin{cases} 1, & a \in [0; 3 \cdot 10^{-7}); \\ -0,008a^2 + 0,008a + 1,0, & a \in [3 \cdot 10^{-7}; 12 \cdot 10^{-7}); \\ 0, & a \geq 12 \cdot 10^{-7}; \end{cases}$$

$$\tilde{\mu}_{f_{a2}}(a) = \begin{cases} 0, & a \leq 7 \cdot 10^{-7}; \\ -0,009a^2 + 0,318a - 1,787, & a \in [7 \cdot 10^{-7}; 28 \cdot 10^{-7}); \\ 0, & a > 28 \cdot 10^{-7}; \end{cases}$$

$$\tilde{\mu}_{f_{a3}}(a) = \begin{cases} 0, & a \leq 22 \cdot 10^{-7}; \\ -0,004a^2 + 0,313a - 4,816, & a \in [22 \cdot 10^{-7}; 34 \cdot 10^{-7}); \\ 1, & a \geq 34 \cdot 10^{-7}. \end{cases}$$



**Рис. 1.4. Функции принадлежности нечетких множеств  $\mu_{f_{\lambda,k}}$**

Функции принадлежности нечетких множеств  $\mu_{f_{\lambda,k}}$  (рис. 1.4):

$$\tilde{\mu}_{f_{\lambda,1}}(\lambda) = \begin{cases} 1, & \lambda \in [0; 0,1]; \\ -15\lambda^2 + 2,5\lambda + 0,9, & \lambda \in [0,1; 0,35]; \\ 0, & \lambda \geq 0,35. \end{cases}$$

$$\tilde{\mu}_{f_{\lambda,2}}(\lambda) = \begin{cases} 0, & \lambda \leq 0,21; \\ -8,333\lambda^2 + 9,25\lambda - 1,567, & \lambda \in [0,21; 0,9]; \\ 0, & \lambda > 0,9. \end{cases}$$

$$\tilde{\mu}_{f_{\lambda,3}}(\lambda) = \begin{cases} 0, & \lambda < 0,75; \\ -6,667\lambda - 5, & \lambda \in [0,75; 0,9]; \\ 1, & \lambda \geq 1. \end{cases}$$

**Алгоритмы выбора метода контроля ТФСМ.** Для определения метода разработано два алгоритма. Один алгоритм использует систему продукционных правил, другой – нечеткие множества (процедуру лингвистической аппроксимации).

Продукционные правила, используемые первым методом, записываются следующим образом:

- ЕСЛИ  $V_{св}^i \equiv V_1$  и  $V_{тр}^i \in \{V_n, V_m\}$  и  $V_{ДФ}^n \equiv V_{ДФ}^n$  и  $V_{опр}^m \in \{V_{дет}, V_{неч}\}$ ,

ТО  $h_{i,j,n,m} \in H_1$  и  $V_M \equiv V_{M_1}$ ;

- ЕСЛИ  $V_{св}^i \equiv V_2$  и  $V_{тр}^i \in \mathcal{V}_{тр}$  и  $V_{ДФ}^n \in \mathcal{V}_{ДФ}$  и  $V_{опр}^m \in \{V_{неопр}, V_{неч}\}$ ,

ТО  $h_{i,j,n,m} \in H_2$  и  $V_M \equiv V_{M_2}$ ;

- ЕСЛИ  $V_{св}^i \equiv V_3$  и  $V_{тр}^i \in \mathcal{V}_{тр}$  и  $V_{ДФ}^n \in \mathcal{V}_{ДФ}$  и  $V_{опр}^m \in \{V_{неопр}, V_{неч}\}$ ,

ТО  $h_{i,j,n,m} \in H_3$  и  $V_M \equiv V_{M_3}$ ;

здесь  $H_1$  – подмножество, соответствующее импульсному методу с линейным нагревателем (ИЛН);  $H_2$  – подмножество, соответствующее импульсному методу с плоским нагревателем (ИПН);  $H_3$  – подмножество, соответствующее методу с постоянным нагревом и с плоским нагревателем (ПНПН).

Алгоритм выбора метода контроля с использованием лингвистической аппроксимации заключается в следующем.

1. Определяется доминирующий признак свойств материала

$q_d$ .

2. Для ИМ задается (пользователем) диапазон возможных

значений  $q_d$ , т.е.  $[q_d^H, q_d^B]$  и  $СП_{доп} = 0,1$ .

3. Рассматривая доминирующий признак как нечеткое множество (граница классов), строится его функция принадлежности треугольной формы

$$\mu_f(q_d) = \begin{cases} 0, & (q_d < q_d^H) \cup (q_d \geq q_d^B); \\ \frac{q_d - q_d^H}{\Delta q_d}, & q_d \in (q_d^H, q_d^O); \\ \frac{q_d^B - q_d}{\Delta q_d}, & q_d \in (q_d^O, q_d^B). \end{cases}$$

4. Определяются точки пересечения  $\mu_f(q_d)$  с  $\mu_{fs}(q_d)$ ,  $s = 1, 2, 3$  и степени принадлежности этих точек  $СП_1, СП_2$  ИМ к соответствующим классам.

5. Принимается решение о выборе метода контроля:

- ЕСЛИ  $|СП_1 - СП_2| > СП_{\text{доп}}$ , ТО используется метод, соответствующий  $СП_{\text{max}}$ ;
  - ЕСЛИ  $|СП_1 - СП_2| < СП_{\text{доп}}$ , ТО выдается рекомендация о применении двух методов;
- здесь  $СП_{\text{доп}}$  – допустимая степень принадлежности;  $СП_{\text{max}}$  – максимальная степень принадлежности.

Покажем использование второго алгоритма на примере ИИИС НК ТФСМ (рис. 1.4).

1. В качестве доминирующего признака рассматривается теплопроводность  $\lambda$ .

2. Пользователь задает примерный диапазон возможных значений теплопроводности  $\lambda^H = 0,2 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$ ,  $\lambda^B = 0,4 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$ .

3. Определяется среднее значение  $\lambda_{\text{cp}} = 0,3 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$  и фиксируется  $\mu_{\text{max}}$ . Строится треугольная функция принадлежности  $\mu_\lambda$ .

4. Функция принадлежности  $\mu_{f_{\text{ИМ}}}$  сопоставляется с формулами принадлежности  $\mu_{\lambda_1}$  и  $\mu_{\lambda_2}$  множеств лингвистической переменной  $\lambda$ .

5. В точках пересечения 1 и 2 треугольной функции с функциями принадлежности  $\mu_{f_{\lambda 1}}$  и  $\mu_{f_{\lambda 2}}$  определяются степени принадлежности по первому и второму классам соответственно 0,55 и 0,60.

6. Так как  $\mu_{f_{\lambda 2}} \approx \mu_{f_{\lambda 1}}$ , то ИМ практически находится на границе двух классов, поэтому целесообразно контроль ИМ выполнять двумя методами, рекомендуемыми для 1 и 2 классов, а результат измерения представить как среднее для двух методов или с учетом достоверности получаемых результатов.

Важной задачей принятия решений в ИИИС является оптимизация режимных параметров  $R$  на основе минимизации функционала  $F$ , определяющего потери оперативности  $\Pi_{оп}$  и точности  $\Pi_{т}$  ИИИС, которые являются основными показателями эффективности работы ИИИС. Для выбранного метода измерения  $M_i$  и конкретного ИМ с моделью  $M_{ИМ}$  данная задача в общем виде формулируется следующим образом

$$F(R; M_i, M_{ИМ}) = \omega_n \Pi_{т}(R; M_i, M_{ИМ}) + \omega_n \Pi_{оп}(R; M_i, M_{ИМ}) \rightarrow \min_{R \in \mathcal{R}_{доп}}, \quad (2.8)$$

где  $\mathcal{R}_{доп}$  – допустимая область изменения режимных параметров;  $\omega_n$  – некоторый вес,  $0 \leq \omega_n \leq 1$ .

## 1.5. МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ И ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ В ИИИС

Для построения модели интеллектуальной системы необходимо наличие трех составляющих: цели, окружающей среды и внутреннего состояния.

Построение модели интеллектуальной системы включает: формирование структуры и алгоритмов функционирования ИИИС в целом; разработку элементов структуры ИИИС, алгоритмов их функционирования, механизма их взаимодействия между собой и с окружающей средой; построение алгоритмов обработки информации в ИИИС.

**Задачи моделирования.** При моделировании ИИИС необходимо определить:

- переменные модели  $M_{ИИИС}$ , методы НК ТФСМ, параметры структуры ИИИС, методы метрологического анализа, дестабилизирующие факторы и критерии оценки функционирования ИИИС;
- сформулировать требования к исходной информации об исследуемых материалах, организовать получение априорной и первичной измерительной информации об ИМ, измерительной ситуации (ИС), ДФ. Кроме того, следует оценить достаточность имеющейся информации об ИМ, ИС, ДФ, результатах классификации ИМ;
- для возможности оценки качества и эффективности процесса функционирования моделируемой ИИИС необходимо выбрать совокупности критериев оценки эффективности в функции параметров и переменных ИИИС с учетом воздействующих дестабилизирующих факторов.

Для возможности получения числовых значений используемых характеристик системы в процессе моделирования применяются аппроксимирующие функции.

Оценка модели проводится на основе оценки достоверности изложенных концепций модели. Такой метод проверки включает следующие процедуры: проверка поставленных задач; проверка достоверности ис-

ходной информации: АИМ, ПИМ, анализ полученных аппроксимаций; проверка построения модели, анализ параметров переменных, входящих в структуру модели ИИИС.

Актуальность применения современных высоких технологий – нечеткого моделирования – обусловлена необходимостью учитывать воздействие многочисленных дестабилизирующих факторов, оказывающих влияние на процессы принятия решений в ИИИС и повышения адекватности математических моделей интеллектуальных информационно-измерительных систем.

Для достижения поставленной цели в ИИИС – оперативное, точное и достоверное определение свойств материалов – предлагается модель с формализованным описанием процесса измерения.

Представим модель ИИИС следующим образом:

$$M_{\text{ИИИС}} = \langle \mathcal{X}, \tilde{V}_{\text{ДФ}}, \mathcal{U}, \mathcal{V}_{\text{М}}, \mathcal{M}_{\text{пр}} \rangle,$$

где  $\mathcal{X} = \{X_i, i = 1, \dots, 3\}$  – множество входных воздействий  $(T_i, \tau_i, F_i)$ ;  
 $\tilde{V}_{\text{ДФ}} = \{\tilde{V}_{(\text{ДФ})_i}, i = 1, \dots, 4\}$  – множество лингвистических переменных соответствующих дестабилизирующих факторов  $(T_{\text{ОС}}, \psi_i, R_{T_i}, W_i)$ ;  
 $\mathcal{U} = \{U_i, i = 1, \dots, m\}$  – множество выходных параметров ИМ  $(\lambda, a, C)$ ;  
 $\mathcal{V}_{\text{М}_i} = \{V_{\text{М}_i}, i = 1, \dots, k\}$  – множество методов НК;  
 $\{\mathcal{M}_{\text{п.р}} = \mathcal{M}_{\text{п.р}_i}, i = 1, \dots, r\}$  – множество методов принятия решений.

Предлагаемая модель ИИИС позволяет сделать выбор оптимального варианта разрабатываемой системы с учетом перспектив расширения области исследуемых материалов для неразрушающего контроля свойств материалов.

**Модель принятия решения.** К интеллектуальным системам, реализующим функцию принятия решений, используя базу знаний, предъявляются следующие требования [10]: учет временного фактора при поиске решения, получение достоверных результатов при возможной неполноте поиска с учетом потерь точности и оперативности; возможность нахождения оптимального решения при анализе точности получаемых результатов НК СМ и затратами вычислительных ресурсов на его получение; использование методов вывода с учетом временного фактора при использовании поступающей от внешних источников и содержащейся в базе знаний системы; использование новейшей процессорной технологии обработки информации; принятие решений на высоком уровне; способность принимать решения на основе символьных преобразований; способность определить класс исследуемого материала, предметную область, измерительную ситуацию, используя базу знаний в ИИИС; способность к синтезу измерительных структур в ИИИС, оценке полученных результатов НК СМ.

В свою очередь, модель задач принятия решений в ИИИС записывается в виде кортежа, содержащего множество методов измерения, измерительных ситуаций, структур и состояний ИИИС и критериев оценки результатов измерения:

$$M_{\text{п.р}} = \langle \mathcal{M}, \mathcal{O}, \mathcal{И}, \mathcal{К}, \mathcal{Z}, \mathcal{E}, \mathcal{G} \rangle,$$

где  $\mathcal{M} = \{M_i, i = 1, \dots, m\}$  – множество применяемых методов;  
 $\mathcal{O} = \{O_i, i = 1, \dots, N\}$  – множество ИМ;  
 $\mathcal{И} = \{И_i, i = 1, \dots, u\}$  – множество измерительных ситуаций;  
 $\mathcal{К} = \{K_i, i = 1, \dots, \kappa\}$  – множество критериев оценки результатов измерений;  
 $\mathcal{Z} = \{Z_i, i = 1, \dots, z\}$  – множество исходных состояний ИИИС;  
 $\mathcal{E} = \{E_i, i = 1, \dots, e\}$  – множество структур в ИИИС;  
 $\mathcal{G} = \{G_i, i = 1, \dots, j\}$  – множество методов, используемых для повышения

эффективности ИИИС (критерий Демпстера-Шафера, метод оптимизации параметров процесса измерения, методы метрологического анализа).

Используемая модель задач принятия решения в ИИИС позволяет оценить показатели эффективности функционирования системы; она оперирует свойствами ИМ, условиями и методами измерений, учитывая структуру ИИИС, критерии оценки результатов измерения. Принятие решений в ИИИС направлено на выбор задачи определения оптимального алгоритма измерений, измерительных процедур на каждом этапе.

Структурная схема, отражающая последовательность выполнения задач принятия решения представлена на рис. 1.5.



**Рис. 1.5. Структурная схема, отражающая последовательность выполнения задач принятия решения**

Принятие решения об эффективности ИИИС осуществляется на основе: принятия решения о принадлежности относительной погрешности результатов измерения к диапазону допустимых относительных погрешностей; принятия решения о выполнении классификации ИМ (правильная или неправильная) на основе определения потерь от непра-

вильной классификации; принятия решения о потерях точности  $P_r$  и оперативности  $P_{оп}$ , при этом выполняется оптимизация критерия оптимальности – минимизация критерия, комплексно учитывающего потери точности и оперативности; принятия решения об оценке достоверности полученных результатов измерения. Для снижения вероятности ошибочных измерений вычисляются меры доверия к результатам измерения, которые определяются с помощью метода Демпстера-Шафера.

## **2. АРХИТЕКТУРА ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ**

---

Приведены общая характеристика интеллектуальных информационно-измерительных систем контроля свойств материалов, стратегии и задачи проектирования, рассмотрено применение методов искусственного интеллекта, сведения о методах и средствах приобретения знаний, которые закладываются в базу знаний ИИИС, принятии решений в системах, обеспечении надежности и подходе к интеллектуализации.

### *2.1. ЗАДАЧИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ*

Целью проектирования ИИИС является повышение точности, оперативности и эффективности информационно-измерительных систем в результате их интеллектуализации.

Применение искусственного интеллекта в информационно-измерительных системах НК СМ позволяет расширить функциональные возможности системы, улучшить характеристики и параметры в результате выполнения следующих требований к системе и решения проблем:

Проведение многоканальных измерений СМ с высокой точностью, сбор информации с измерительных датчиков (термопар), контроль температуры, автоматизация исследований и испытаний, градуировка и поверка датчиков, контроль параметров среды в производственных процессах. Автоматический контроль при разрешении по напряжению 0,1 мкВ. При использовании в качестве датчиков термопар типа хромель-копель вносимая погрешность составляет не более 0,1 К.

Выполнение последовательности измерительных процедур, управления и обработки входной информации, принятия решений и представления результатов в цифровом виде.

Возможность синтеза алгоритма функционирования ИИИС в текущей измерительной ситуации.

Идентификация информации об окружающей среде, используемом материале и обеспечение в результате адаптации к воздействующим внешним и внутренним ДФ.

Решение проблемы пополнения базы знаний.

Обеспечение высокого быстродействия для выполнения в системе расчетов, оптимизации, принятия решений, прогноза и моделирования результатов измерения.

Формирование измерительной информации в частотно-им-пульсной форме для последующего преобразования в цифровую форму, которая обеспечивает высокую помехоустойчивость при передаче сигналов, стабильность обработки параметров (независимость от времени и влияния изменений в окружающей среде).

Обеспечение гибкости системы в результате способности к перестройке структуры аппаратных средств, измерительных и управляющих функций посредством программ средств.

Реализация модульного принципа проектирования на базе современных открытых стандартов на измерительно-управляющее оборудование, возможность модернизации путем установки требуемых модулей и замены прикладного программного обеспечения, обеспечение работы в различных условиях: в цехах предприятий, в научных лабораториях, при удаленном доступе, в полевых условиях при воздействии дестабилизирующих факторов.

Разработка программного обеспечения, осуществляющего первичную математическую обработку информации по заданным формулам и аппроксимирующим зависимостям, просмотр по выбору оператора измеряемых аналоговых и дискретных сигналов в темпе эксперимента, передачу результатов измерений в локальную сеть предприятия в процессе измерения параметров свойств материалов, интеллектуальные процедуры принятия решений в ИИИС, формирование базы знаний в системе, обработку полученных массивов данных с помощью специализированных пакетов прикладных программ для решения вопросов прогнозирования, идентификации и управления измерениями СМ, переноса результатов измерений в компьютер, их сохранения, просмотра, анализа, а также печати отобранных результатов в виде таблиц с указанием времени и даты проведения измерений, вида материала и значений параметров СМ.

Простые аппаратные решения, поддержанные мощными программными средствами обнаружения ошибок, тестирования и самокоррекции, должны обеспечивать малую вероятность неустранимой ошибки и высокую стабильность метрологических характеристик, что способствует обеспечению надежности ИИИС.

Постоянное развитие – расширение функциональных возможностей, улучшение оперативности НК ТФСМ и метрологических характеристик.

Для решения поставленных задач и достижения поставленной цели необходимо разработать стратегии измерений, определяющие проведение неразрушающего контроля свойств материалов в соответствии с выбранными методом измерения и оптимальным алгоритмом функционирования ИИИС.

## **2.2. СТРАТЕГИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ**

Развитие и применение интеллектуальных ИИС обусловлено воздействием внутренних и внешних дестабилизирующих факторов на ИИИС, изменением свойств исследуемых материалов, которые влияют на метрологический уровень результатов измерения. Создание ИИИС контроля свойств материалов на основе применения стратегий измерения позволит осуществить контроль СМ и изделий в условиях неполноты априорной и текущей информации об объекте и неконтролируемых возмущений различного происхождения с допустимой для исследуемых материалов и изделий точностью [11].

Необходимость проектирования ИИИС возникает также в тех случаях, когда предметные области находятся постоянно в процессе развития. Поэтому основой таких интеллектуальных систем является постоянно развиваемая модель предметной области на основе непрерывно пополняемой базы знаний.

В связи с этим интеллектуальные информационно-измерительные системы должны иметь созданную базу знаний, адекватно отражающую информацию о предметной области и быть приспособленными для перестройки аппаратных и программных средств в соответствии с выбранной стратегией в зависимости от измерительной ситуации.

Для проведения НК ТФСМ при различных измерительных ситуациях исследовано множество стратегий

$$S = \{S_{\text{пр}}, S_{\text{ид}}, S_{\text{кор}}, S_{\text{ком}}\},$$

где  $S_{\text{ид}}$  – идентификация параметров ИМ;  $S_{\text{кор}}$  – коррекция алгоритмов функционирования ИИИС в зависимости от измерительной ситуации;  $S_{\text{ком}}$  – комбинированная стратегия на основе стратегий  $S_{\text{ид}}$  и  $S_{\text{кор}}$ , позволяет осуществить НК ТФСМ с учетом воздействия ДФ на ИИИС и ИМ;  $S_{\text{пр}}$  –

программная стратегия осуществляет выбор из заданного их множества в результате оценки измерительной ситуации и результатов тестовых измерений СМ [12, 13].

Идентифицирующая стратегия  $S_{ид}$  предполагает сбор информации о характеристиках объекта и измерительной ситуации на стадии подготовки и проведения теплофизических измерений ИИИС в результате воздействия дестабилизирующих факторов. Например, дестабилизирующими факторами, воздействующими на работоспособность ИИИС НК ТФСМ, являются: температура окружающей среды, влажность исследуемых материалов, шероховатость поверхности ИМ, контактное сопротивление [14]. Идентифицирующая стратегия  $S_{ид}$  совместно с базой знаний ИИИС используется для установления отклонения параметров интеллектуальной системы от внесенных в нее при тестировании, и ИМ от его параметров при нормальных условиях эксплуатации, имеющихся в базе знаний.

При корректирующей стратегии  $S_{кор}$  осуществляется коррекция алгоритмов функционирования ИИИС, параметров объекта и результатов измерения НК свойств материалов. При коррекции возможно изменение алгоритма измерения в зависимости измерительной ситуации, от класса теплопроводности исследуемых материалов и изделий, мощности теплового воздействия, диапазона усиления измерительного усилителя, изменение структуры ИИИС и др. Корректирующая стратегия дает возможность получить более точные результаты измерений ИИИС.

Комбинированная стратегия  $S_{ком}$  на основе идентифицирующей и корректирующей стратегии позволяет осуществить НК ТФСМ и получить информацию о параметрах свойств материалов с учетом воздействия дестабилизирующих факторов на ИИИС и исследуемые материалы.

Программная стратегия  $S_{пр}$  определяет алгоритм синтеза стратегий  $S_{ид}$ ,  $S_{кор}$ ,  $S_{ком}$  и перестройки программного обеспечения интеллектуальной системы в зависимости от сложившейся измерительной ситуации.

### 2.3. ИНФОРМАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ИИИС

Проектирование ИИИС включает задачу разработки информационной модели системы. Определяется основное содержание модели и метод построения математической модели на основе принятых гипотез и предположений. При этом должны учитываться следующие особенности: исходная постановка задачи моделирования; предметные области, в рамках которых планируется функционирование системы, функции и структура системы, взаимодействие ее элементов, взаимодействия с внешней средой, методы решения задачи моделирования.

Методика решения задачи построения информационной модели ИИИС заключается в следующем:

1. Составляется исходная информация об исследуемых материалах. Выполняется анализ результатов классификации и математической модели исследуемых материалов для рассматриваемой предметной области. Устанавливается множество определяемых параметров  $U_n$  в соответствии с требованиями пользователя ИИИС. При этом определяется множество выходных сигналов априорной информации, их уровней и диапазонов  $d_i$  с исследуемых материалов.

2. Формируются требования к исходной информации. Для этого с помощью системы измерительных преобразователей (СИП) снимаются термограммы, проводятся тестовые измерения с целью выявления исходной экспериментальной информации о исследуемых материалах. При этом учитывается множество воздействующих дестабилизирующих факторов  $V_{ДФ}$ .

3. Определяются информационные параметры ИИИС. Уровни входных сигналов при воздействии ДФ, поступающие на входы аналого-цифрового преобразователя соответствующего микроконтроллера, диапазоны которых задаются множеством  $J_{вх.ДФ}$ . Уровни выходных сигналов, формирующихся на выходах соответствующего микроконтроллера, задаются множеством  $J_{вых.ДФ}$ . Решаются вопросы определения сигналов пуска

ИИИС  $J_{\Pi}$  и управляющего сигнала  $J_{\text{упр}}$ , позволяющего подключить микроконтроллер, реализующий алгоритм функционирования для соответствующей предметной области и определяемых параметров.

4. Выбираются и анализируются параметры информационного канала передачи и обработки полученной информации из системы измерительных преобразователей, поступающей в микроконтроллеры: объем памяти микроконтроллеров (ПМК)  $J_{\text{ПМК}}$ , необходимый для хранения априорной, промежуточной, экспериментальной информации. Важными параметрами также являются: среднее время передачи информации (ПИ)  $t_{\text{ПИ}}$  по информационным каналам и обработки полученной информации (ОПИ)  $t_{\text{ОПИ}}$ . Параметры информационного канала (ИК) представляются множеством  $J_{\text{ИК}}$ .

5. Создается информационный канал пользователя (ИКП). Формируется множество информационных параметров  $J_{\text{ИКП}}$ , известных с определенной мерой доверия, которые пользователь заносит в базу знаний информационной системы (пользовательские данные) в процессе эксплуатации системы. Информация включает сведения о предметной области, исследуемых материалах, структуре ИИИС, диапазонах определяемых параметров, мощности теплового воздействия на ИМ, дестабилизирующих факторах для рассматриваемой предметной области.

6. На этапе проектирования эксперт вносит в базу знаний системы информацию, включающую сведения пользователя, изложенные в п. 5, а также информацию для  $n$ -других предметных областей, для которых возможно определение параметров качественных свойств материалов в проектируемой системе  $J_{\text{ИЭ}}$ . При этом учитывается информация как экспериментальная, так и априорная (ИЭ).

7. Формируются информационные каналы для создания базы знаний: пользовательский  $J_{\text{ПК}}$ , экспертный  $J_{\text{ЭК}}$ , априорной  $J_{\text{апр}}$ , экспериментальной  $J_{\text{ЭК}}$  и текущей информации  $J_{\text{тек}}$ , моделей  $J_{\text{мод}}$ , методов  $J_{\text{мет}}$  и алгоритмов  $J_{\text{ал}}$  функционирования системы.

Информация базы знаний представляется множеством  $J_{\text{БЗ}}$ .

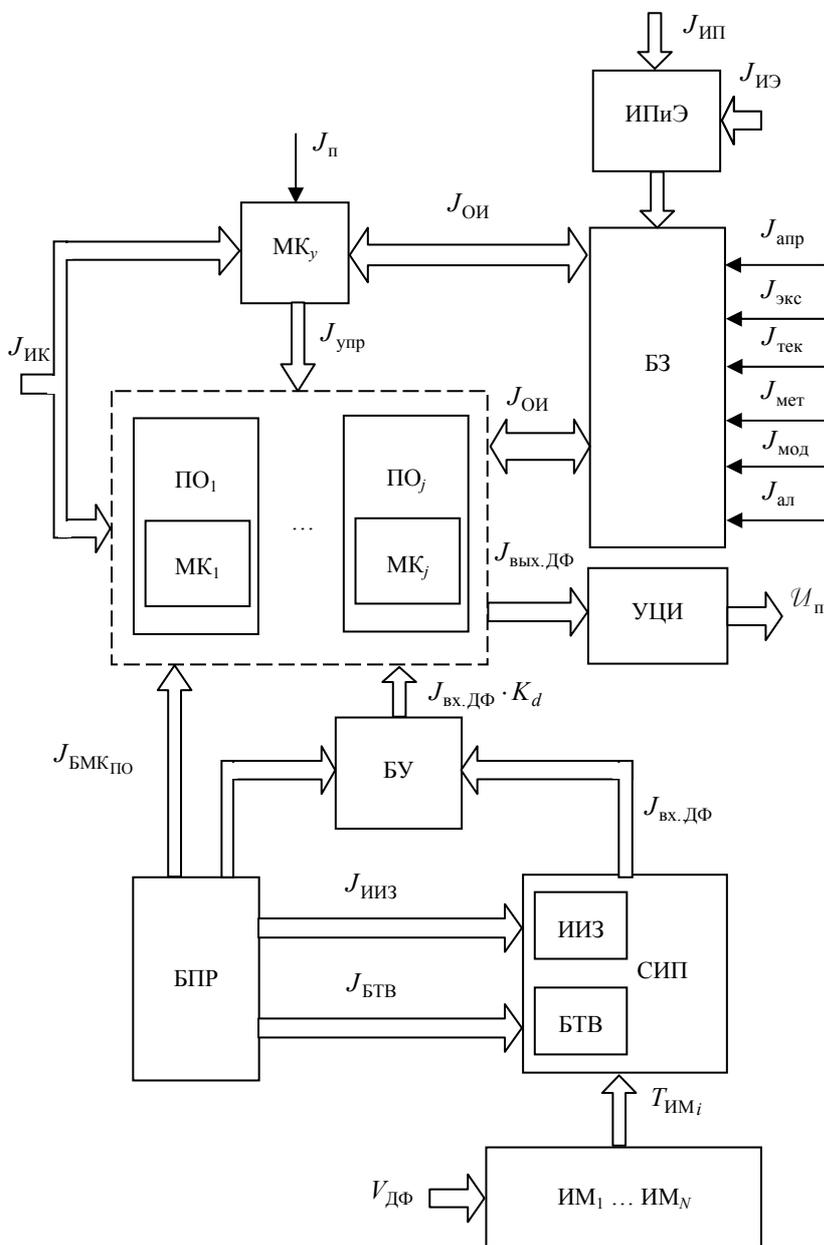
8. Создаются информационные каналы блока принятия оптимальных решений (БПР) в условиях неопределенности. При этом формируются информационные сигналы в блок усилителей (БУ) для выбора структуры усилителя  $J_{\text{БУ}}$ , интеллектуальный измерительный зонд (ИИЗ) для формирования соответствующей структуры зонда  $J_{\text{ИИЗ}}$ , в блок формирования теплового воздействия (БТВ) на исследуемые материалы ( $J_{\text{БТВ}}$ ), в блок микроконтроллеров (БМК) для подключения микроконтроллера соответствующей предметной области ( $J_{\text{БМК}}$ ). Информация блока принятия решений (БПР) отображается множеством  $J_{\text{БПР}}$ .

9. Составляется информация о архитектуре информационно-измерительной системы, структуре и алгоритме функционирования. Структуры ИИИС можно представить множеством  $J_{\text{ИИИС}}$ . Архитектура ИИИС отражает модель представления знаний (базу знаний), методы принятия решений, используемую структуру ИИИС, включая устройство цифровой индикации (УЦИ) полученных результатов измерения и интерфейс пользователя и эксперта (ИПиЭ). Применяемые при проектировании структуры отличаются переносными вычислительными блоками, которые характеризуются используемыми видами микроконтроллеров, структурой блоков усилителей, интеллектуальных измерительных зондов с соответствующими микроконтроллером, в котором зашито программное обеспечение для конкретной предметной области, и измерительной ячейкой, структурой блоков питания и формирования тепловых импульсов.

10. Оценивается техническая эффективность моделируемой системы множеством критериев  $\mathcal{E}_{\text{ИИИС}}$  при функционировании в условиях неопределенности при воздействии дестабилизирующих факторов. В качестве критериев технической эффективности используются: потери точности  $\Pi_{\text{т}}$ , потери оперативности  $\Pi_{\text{оп}}$  и относительная погрешность измерения  $\delta$ .

Структурная схема информационной модели ИИИС с указанием прохождения информационных каналов, сигналов обмена информацией ( $J_{ОИ}$ ) представлена на рис. 2.1.

На основе полученной информации формируются требования к объекту моделирования и составляется информационная модель ИИИС.



**Рис. 2.1. Структурная схема информационной модели ИИИС контроля свойств материалов**

Модель интеллектуальной информационно-измерительной системы представлена следующим кортежем множеств:

$$M_{инфИИС} = \langle \mathcal{F}_{ИМ}^d, U_{п}, V_{ДФ}, J_{вх.ДФ}, J_{вых.ДФ}, J_{ИК}, J_{ИП}, J_{ИЭ}, J_{БЗ}, J_{БПР}, J_{ИИИС}, \mathcal{D}_{ИИИС} \rangle,$$

где  $\mathcal{F}_{ИМ} = \{T_i^{d_j}, i = 1, \dots, N; d_j, j = 1, \dots, p\}$  – множество выходных сигналов с исследуемых материалов;  $U_{п} = \{U_i, i = 1, \dots, m\}$  – множество определяемых параметров;  $V_{ДФ} = \{V_{R_T}, V_W, V_{\psi}, V_T\}$  – множество дестабилизи-

рующих факторов;  $J_{\text{вх.ДФ}} = \{J_{\text{вх.ДФ}}^d, i = 1, \dots, x\}$  – множество входных сигналов при воздействии ДФ;  $J_{\text{вых.ДФ}} = \{J_{\text{вых.ДФ}}^d, i = 1, \dots, y\}$  – множество выходных сигналов при воздействии ДФ;  $J_{\text{ИК}} = \{J_{\text{ПМК}}, t_{\text{ПИ}}, t_{\text{ОИ}}\}$  – множество параметров информационного канала;  $J_{\text{ИП}} = \{J_{\text{ИП}_i}, i = 1, \dots, l\}$  – множество информации, поступающей от пользователя;  $J_{\text{ИЭ}} = \{J_{\text{ИЭ}_i}, i = 1, \dots, I\}$  – множество информации, поступающей от эксперта;  $J_{\text{БЗ}} = \{J_{\text{ПК}}, J_{\text{ЭК}}, J_{\text{апр}}, J_{\text{экс}}, J_{\text{тек}}, J_{\text{мет}}, J_{\text{мод}}, J_{\text{ал}}\}$  – множество информации, хранящейся в базе знаний;  $J_{\text{БПР}} = \{J_{\text{БУ}}, J_{\text{ИИЗ}}, J_{\text{БТВ}}, J_{\text{БМК}}\}$  – множество информации, поступающей с блока принятия решений;  $J_{\text{ИИИС}} = \{J_{\text{ИИИС}_i}, i = 1, \dots, y\}$  – множество структур ИИИС;  $\mathcal{D}_{\text{ИИИС}} = \{P_{\text{т}}, P_{\text{оп}}, \delta\}$  – множество критериев оценки технической эффективности системы.

На основе информационной модели создается архитектура интеллектуальной информационно-измерительной системы.

## 2.4. СТРУКТУРА ИИИС

Применение информационных технологий, развитие принципов построения ИИС позволяет синтезировать структуру ИИИС, используя комплекс аппаратных и программных модулей. Синтез структуры ИИИС осуществляется в соответствии с поставленными задачами и стратегиями проектирования интеллектуальных ИИС.

Применение методов искусственного интеллекта является одним из основных направлений построения ИИИС НК СМ в условиях неопределенности.

В интеллектуальных измерениях основная роль отводится моделированию процесса контроля свойств материалов и информации: априорной и текущей. При этом используются результаты математического моделирования ИИИС и принятия решений в системе, модели исследуемых материалов, предметной области, распознавание образов и алгоритм выбора метода контроля свойств материалов.

Разработка ИИИС выполнена на основе предложенных методов НК свойств материалов, анализа алгоритма и структуры измерительной цепи, воздействующих дестабилизирующих факторов на ИИИС, изложенных в четвертой главе; разработанного математического обеспечения, созданной базы знаний, стратегий измерения для повышения метрологического уровня результатов измерений [15]. При этом учитывается множество возможных структур системы измерительных преобразователей, множество используемых микроконтроллеров, на основе которых создается база знаний системы, переход от одной базы знаний к другой в зависимости от назначения предметной области.

ИИИС должна обеспечивать: регистрацию аналоговых сигналов измерительных датчиков при многоканальном вводе информации, формирование дискретных сигналов управления, работу в составе локальной сети предприятия, реализацию интеллектуальных процедур принятия оптимальных решений о выборе модели ИМ, измерительной ситуации, о качестве НК СМ и других процедур в условиях неопределенности.

В соответствии с вышеизложенным, архитектура интеллектуальной информационно-измерительной системы НК СМ должна содержать следующие основные компоненты: базу знаний, блок принятия решений (БПР), пользовательский интеллектуальный интерфейс (ПИИ) общения пользователя (П) и эксперта (Э), блок логического вывода (БЛВ).

Основными аппаратными средствами являются: компьютер (К), интеллектуальный датчик (ИД), включающий систему измерительных преобразователей (СИП), переносной вычислительный блок (ПВБ). В СИП в результате применения методов искусственного интеллекта осуществляется выбор соответствующих измерительных преобразователей в зависимости от решаемой измерительной задачи по определению качественных характеристик ИМ. Эти функции реализуют разработанные интеллектуальные

датчики с использованием микроконтроллеров с соответствующим алгоритмическим обеспечением.

Структурная схема ИИИС представлена на рис. 2.2.

ПВБ предназначен для измерения, регистрации, обработки и хранения экспериментальных данных, идентификации информации о воздействующих ДФ, синтеза алгоритма измерений и структуры ИИИС в зависимости от измерительной ситуации, выполнения последовательности измерительных процедур, управления измерениями, принятия решений и представления выходной информации в виде, удобном для пользователя, формирования алгоритма измерений и синтеза структуры системы.

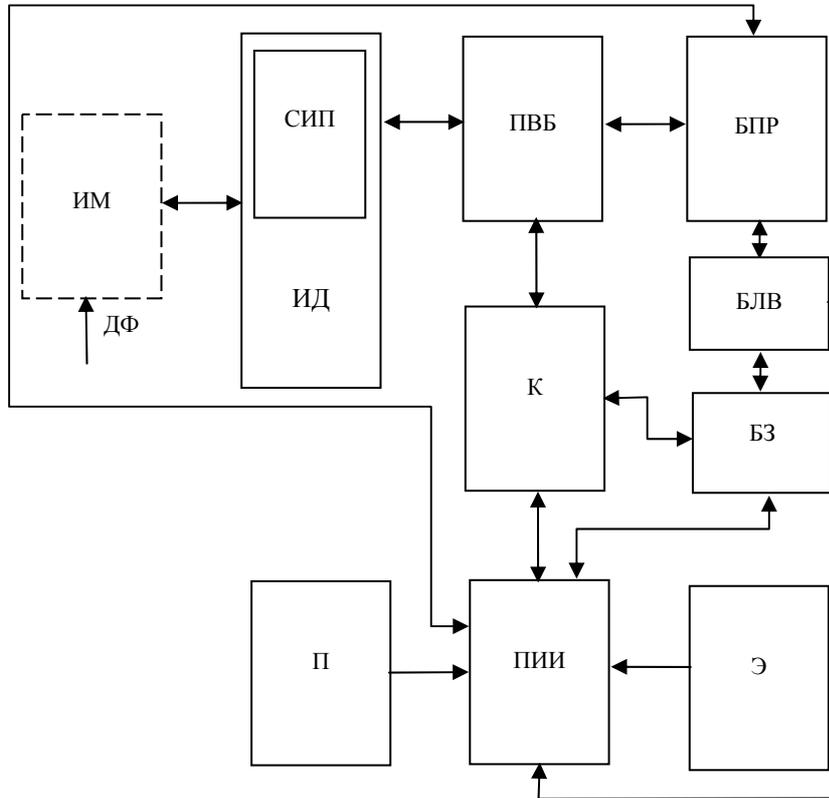


Рис. 2.2. Структурная схема ИИИС

Подключение компьютера позволяет соединить систему с локальной сетью вуза или предприятия и использовать ИИИС для дистанционного контроля измеряемых параметров, постоянно пополнять базу знаний, переносить результаты измерений из ПВБ в компьютер для их хранения, просмотра, анализа и обработки.

Математическое и алгоритмическое обеспечение интеллектуальной системы включает математические модели предметной области, исследуемого материала, решение задач классификации, распознавания образов и выбора метода контроля параметров ИМ в зависимости от измерительной ситуации. В этой главе также рассмотрены математические модели ИИИС и принятия решений при функционировании системы в условиях неопределенности, а также модель представления знаний.

С помощью программного обеспечения ИИИС осуществляется математическая обработка измерительной информации по заданным формулам и аппроксимирующим зависимостям, интеллектуальная процедура принятия решений в системе, формирование и использование базы знаний, решение задач прогнозирования результатов измерения, идентификации измерительной ситуации и управления измерениями.

СИП и переносной блок выполняются на основе микроконтроллеров с большим объемом памяти и высоким быстродействием, коммуникабельна, имеет возможность самодиагностирования, самопроверки, автоматической коррекции погрешностей изменения, автоматической классификации и

кластеризации, адаптации к классу ИМ, накоплению данных для последующего анализа и обработки, что и определяет их интеллектуальный уровень, т.е. позволяет ИИИС определять параметры ИМ с задаваемыми и прогнозируемыми показателями оперативности, точности и достоверности. ИИИС в полной мере использует различные методы контроля, оптимизации режимных параметров процесса измерений, информацию, получаемую от экспертов и пользователей, методы принятия решения в условиях неопределенности, а также информацию, содержащуюся в базе знаний.

В зависимости от назначения системы, сложности выполняемых ею функций, объема хранимой информации, формируется база знаний системы на основе использования постоянной памяти компьютера.

В интеллектуальной системе применяется пользовательский интеллектуальный интерфейс. Интерфейс позволяет осуществлять получение необходимой информации из базы знаний, которая может быть задана не в явном виде, а вывести ее из тех знаний и данных, которые хранятся в БЗ.

С помощью ПИИ эксперт и пользователь могут вводить требуемую информацию (основную и дополнительную) для решения поставленных задач в рассматриваемой предметной области: о свойствах и параметрах исследуемых материалов, измерительной ситуации, рекомендации по использованию методов контроля СМ. Кроме того, эксперт при проектировании ИИИС НК СМ с расширенными функциональными возможностями при контроле СМ в ряде предметных областей вносит дополнительную информацию для развития и пополнения базы знаний.

Большое внимание при проектировании системы необходимо уделять воздействию дестабилизирующих факторов для рассматриваемых предметных областей. Соответствующая информация о ДФ в конкретной предметной области, аппроксимирующие зависимости определяемых параметров от ДФ, по которым будет осуществляться коррекция результатов измерения, должна быть заложена в базе знаний системы. А также информация о ДФ должна вноситься в процессе измерения на основе текущей информации при контроле СМ.

В отличие от адаптивных измерений, когда изменяются параметры измерительного процесса, интеллектуальные измерения предполагают использование промежуточных измерений и результатов вспомогательных измерений для формирования алгоритма измерений в процессе его выполнения. Адаптация является одной из функций ИИИС. Однако, в адаптивных измерениях используется известный заранее алгоритм, а в интеллектуальных системах – алгоритм, создающийся в процессе измерений.

При создании интеллектуальных ИИС используется математическое моделирование, реализующее определенную последовательность действий: исследуется объект, создается модель, определяется вычислительный алгоритм, разрабатывается программное обеспечение, выполняется расчет результатов измерений. При этом выбирается определенный метод решения задачи.

Каждое измерение в ИИИС содержит процедуры измерения и оценки погрешности результатов измерения.

Измеряемую величину можно оценить критерием качества

$$K_k = f(M, U_{\text{изм}}, U_{\text{изм.эт}}),$$

где  $M$  – метод измерений СМ;  $U_{\text{изм}}$  – значение измеряемого параметра СМ;  $U_{\text{изм.эт}}$  – эталонное значение измеряемого параметра СМ.

Разрабатываемая ИИИС позволяет осуществить структурно-параметрическую адаптацию в результате принятия решения о выборе оптимальных энергетических и режимных параметров в соответствии с классами и диапазонами исследуемых материалов, а также автоматическую целенаправленную коррекцию результатов измерения при воздействии доминирующих дестабилизирующих факторов, оценку качества и надежности системы при проведении измерений в лабораторных, полевых условиях и условиях производства.

#### 2.4.1. Интеллектуальные измерительные датчики

Проектирование измерительных датчиков необходимо для информационно-измерительных систем различного назначения, в том числе для систем

контроля свойств материалов и изделий. Разработка интеллектуальных датчиков связана с необходимостью получения измерительной информации в информационно-измерительных системах, работающих в условиях неопределенности. Интеллектуальный датчик должен иметь возможность работы в комплекте с любой информационно-измерительной системой для соответствующих предметных областей. Для этого должна быть конструктивная, методическая, алгоритмическая, технологическая, информационная и метрологическая совместимость.

Задачи проектирования и требования, которые предъявляются к измерительным датчикам, следующие:

1. Проектирование измерительных датчиков с возможностью передачи информации для большого числа измерительных каналов, т.е. в датчиках предусмотреть систему измерительных преобразователей.

2. Длительный период безотказной работы.

3. Устойчивость к воздействию дестабилизирующих факторов: температуры окружающей среды, влажности, шероховатости поверхности исследуемых материалов, контактному термосопротивлению в области контакта датчика и исследуемого материала.

4. Стабильность и воспроизводимость выходных параметров при исследованиях в конкретной предметной области.

5. Достоверность результатов измерения и допустимая для конкретных предметной области и метода измерения погрешность.

6. Обеспечение метрологических характеристик, указанных в аттестационной документации при соответствующей поверке.

Задачи интеллектуализации измерительных датчиков заключаются в реализации следующих интеллектуальных функций:

1. Применение методов искусственного интеллекта, информационных технологий при разработке интеллектуальных датчиков, получение измерительной информации в которых осуществляется в условиях неопределенности.

2. Возможность самоповерки, заложенной в алгоритмическом обеспечении ИД, коррекция выходной информации с датчиков при воздействии дестабилизирующих факторов.

3. Универсальность интеллектуальных датчиков, которая создается благодаря формированию базы знаний для конкретной предметной области с использованием микроконтроллера и разработке конструкции датчика, позволяющей использовать набор измерительных ячеек датчиков и осуществлять выбор измерительной ячейки в соответствии с функциональным назначением ИД и методом измерения определяемых параметров.

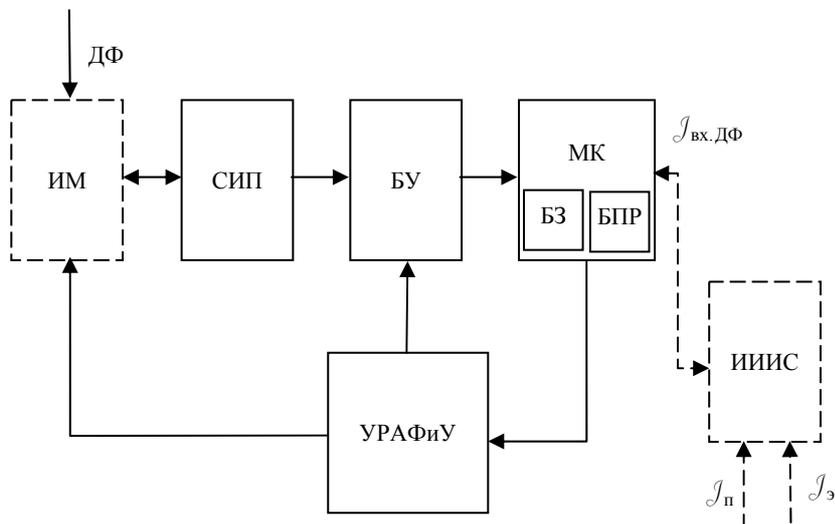
4. Осуществление интеллектуальной процедуры оптимизации режимно-энергетических параметров измерений и контроля свойств исследуемых материалов в условиях неопределенности.

5. Разработка программного обеспечения измерительных датчиков, включающее программирование применяемых методов измерения, алгоритмов, измерительных процедур, методов метрологического анализа, которое прошивается в память микроконтроллера ИД.

6. Реализация интеллектуальной процедуры контроля исходного состояния измерительного датчика, т.е. контроля параметров первичных измерительных преобразователей (ПИП), например термопар при контроле теплофизических свойств материалов, сопротивления нагревательных элементов, «нуля» на выходе операционных усилителей, применяемых при сигналах микровольтового уровня из ПИП. Контроль осуществляется по соответствующим значениям, заложенным в систему допускового контроля, программным способом.

7. Увеличение эксплуатационного и метрологического ресурсов интеллектуальных датчиков предлагается увеличить за счет разработки оригинальных надежных конструкций датчиков, позволяющих исключить механическое повреждение, например, первичных измерительных преобразователей, нагревательных элементов и подложки в измерительном зонде при контроле теплофизических свойств материалов. Кроме того, необходимо применять высокостабильные радиоэлементы в измерительных цепях датчика с малым коэффициентом старения и высокой устойчивостью к воздействию дестабилизирующих факторов.

Таким образом, исходя из задач проектирования ИД, учета требований, предъявляемым к интеллектуальным датчикам и задач интеллектуализации, в структуру интеллектуального датчика входят следующие блоки и устройства: система измерительных преобразователей, микроконтроллер (МК), блок усилителей (БУ) и устройство, реализующее алгоритм функционирования и управления проводимыми измерениями (УРАФиУ). Структурная схема интеллектуального датчика приведена на рис. 2.3.



**Рис. 2.3. Структурная схема интеллектуального датчика**

Схема измерительных преобразователей формируется в соответствии с назначением ИИС. Например, для контроля теплофизических свойств материалов в СИП используются термодпары. Тип усилителей, коэффициенты усиления в блоке усилителей выбираются в процессе измерений программным способом, используя информацию из базы знаний. Выбор алгоритма функционирования датчика и управление проводимыми измерениями осуществляется с помощью блока принятия решений на основе априорной информации, хранящейся в базе знаний, текущей информации, поступающей из СИП, а также от пользователя и эксперта.

Интеллектуальные процедуры, которые реализуются в ИД, служат основой для оперативного контроля и измерения определяемых параметров в ИИИС, повышения точности и достоверности результатов измерения.

## 2.5. БАЗА ЗНАНИЙ ИИИС

В интеллектуальных системах знания хранятся в специальном программном или программно-аппаратном блоке, называемом базой знаний. Интеллектуальная система использует систему знаний, выполняя над ней разнообразные операции, такие, как поиск необходимых сведений, их модификация, интерпретация знаний, вывод из имеющихся знаний новых и т.п. Алгоритмы выполнения этих операций существенно зависят от особенностей языка представления знаний от того, каким образом система знаний представляется в ИИИС. Поскольку система знаний ценна не сама по себе, а именно возможностями ее применения и поскольку алгоритмизация операций с этой системой определяется языком представления знаний, любой современный метод представления знаний представляет собой совокупность и взаимосвязанность средств формального описания знаний и манипулирования этими знаниями.

База знаний является частью предлагаемой интеллектуальной системы НК СМ и содержит исчерпывающий объем априорной и апостериорной информации, необходимый для реализации измерительной процедуры по определению свойств твердых материалов для рассматриваемой предметной области, расчета параметров СМ, метрологического анализа результатов измерения, поэтапного принятия решения от процесса идентификации исследуемого материала до получения конечного результата, например параметров ТФСМ.

В базе знаний формируется и хранится информация о классах исследуемых материалов (например, диапазоны теплопроводности, температуропроводности, теплоемкости, плотности, структура ИМ и др.), режимных параметрах измерительной ситуации, методах НК СМ и их параметрах, методах калибровки и тестирования ИИИС, методах метрологического анализа, математических зависимостях для определения качественных характеристик ИИИС (потерь точности и оперативности, мер доверия к результатам измерения), аппроксимирующих зависимостях для определения дестабилизирующих факторов, воздействующих на ИИИС, эталонных значениях параметров СМ и др.

Перспективной формой представления знаний являются фреймы, благодаря своей универсальности и гибкости [16]. Фрейм любого вида – эта та минимально необходимая структурированная информация, которая однозначно определяет данный класс ИМ. Наличие фрейма позволяет отнести ИМ к тому классу, который им определяется. Фрейм можно представить в виде сети, состоящей из узлов и связей между ними.

В ИИИС НК СМ знания представляются в виде фреймовой модели, состоящей из кластеров знаний о предметной области, моделях исследуемых материалов, об измерительных ситуациях, измерительных каналах, измерительных процедурах и метрологическом обеспечении ИИИС [17].

База знаний ИИИС содержит априорную и апостериорную информацию, необходимую для реализации измерительных процедур для рассматриваемой предметной области, метрологического анализа (МА) результатов измерения, поэтапного принятия решения от процесса идентификации ИМ до получения параметров, сведения об эффективности измерения. В базе знаний формируется и хранится информация о классах ИМ, параметрах измерительной ситуации, методах измерения и их параметрах, методах калибровки и тестирования ИИИС, методах МА, математических зависимостях для определения качественных характеристик измерений с помощью ИИИС (потерь точности и оперативности, мер доверия к результатам измерения), аппроксимирующих зависимостях для определения ДФ, справочных значениях параметров, оценки результата измерений.

Фреймовая модель представления знаний в ИИИС НК СМ показана на рис. 2.5. Для реализации интеллектуальных процедур в ИИИС необходимо составить фреймы-экземпляры, имена которых: «Предметная область», «Измерительная ситуация», «Измерительный канал», «Измерительная процедура», «Метрологическое обеспечение», «Принятие решений». Имя каждого слота изображенных фреймов-экземпляров позволяет определить конечную цель и назначение фреймов.

Далее необходимо подробно рассмотреть представленные на рис. 2.5 фреймы-экземпляры.

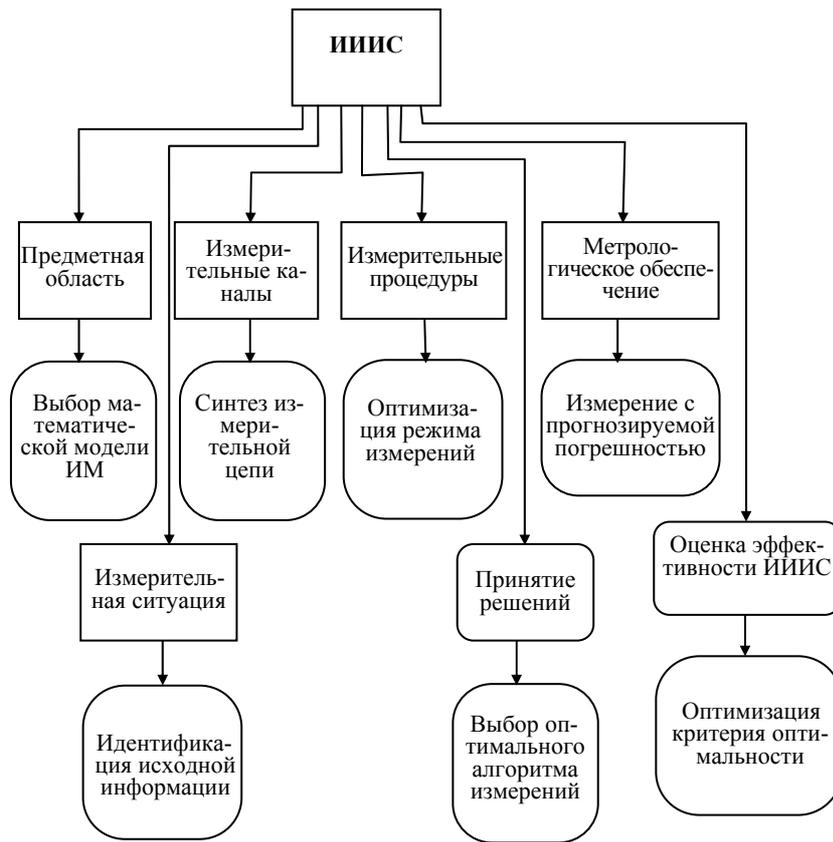
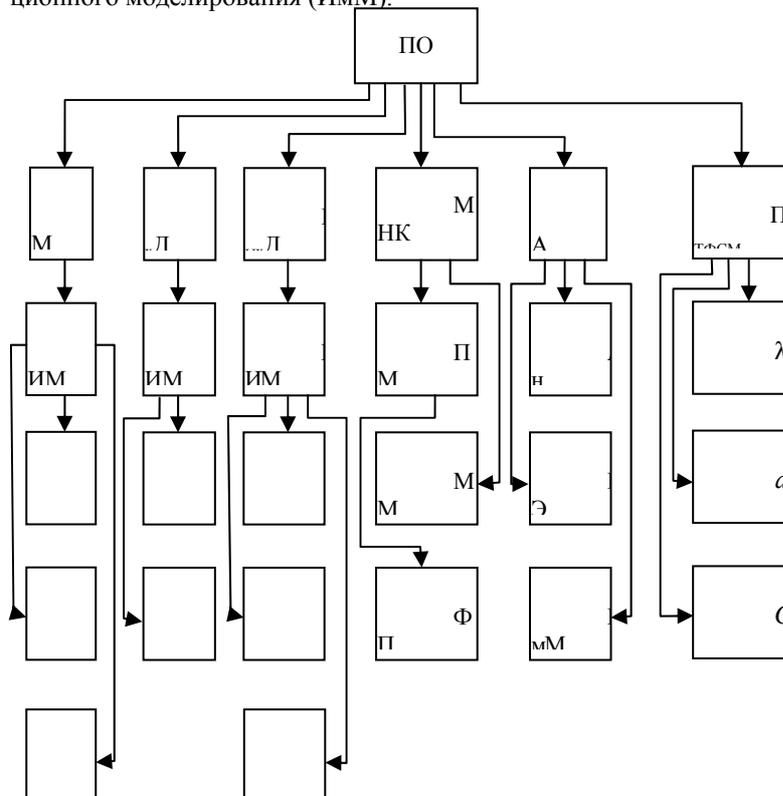


Рис. 2.5. Схема фреймовой модели представления знаний в ИИИС

Фрейм предметной области при контроле теплофизических свойств материалов изображен на рис. 2.6. Фрейм ПО содержит следующие слоты: исследуемые материалы, входные данные (ВхД), выходные данные (ВыхД), используемые методы неразрушающего контроля теплофизических свойств материалов ( $M_{НК\ ТФСМ}$ ), применяемые методы метрологического анализа результатов НК ТФСМ (МА), взаимосвязи между компонентами (ВС), определяемые параметры ТФСМ ( $P_{ТФСМ}$ ). Применяются поведенческие модели (ПМ) и математические (ММ). В ПМ определяются функции принадлежности (ФП) нечетких множеств определяемых параметров.

Метрологический анализ выполняется следующими методами: аналитическим (Ан), с помощью метрологического эксперимента (МЭ) и имитационного моделирования (ИмМ).

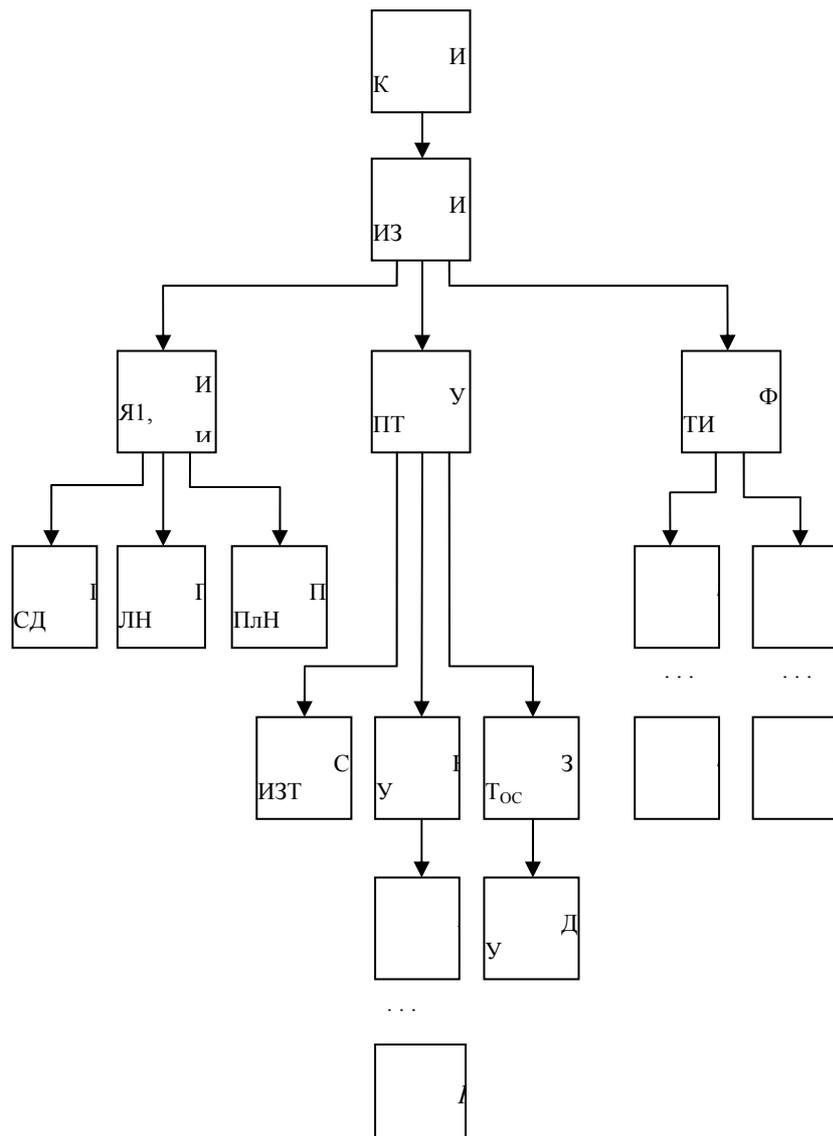


**Рис. 2.6. Фреймовое представление знаний о предметной области**

Слоты фрейма ПО определяют ИМ по диапазону теплопроводности  $O_{\lambda_N}^{(d)}$ , сведения о значениях которой получены на основе первичной измерительной информации об ИМ по тестовой термограмме. Входные данные представляют собой совокупность априорной информации об ИМ – плотности  $(\rho_N^{(d)})$  и шероховатости  $(\psi_N^{(d)})$  с указанием их диапазонов. Выходные данные об ИМ определяются из первичной измерительной информации (ИИЗ) об ИМ по тестовой термограмме: контактное термосопротивление  $(R_{T_N}^{(d)})$ , влажность  $(W_N^{(d)})$ , температурное поле в области контакта ИМ и ИИЗ  $(T_N^{(d)})$ . Определяемыми параметрами в ИИИС являются: теплопроводность  $\lambda_N^{(d)}$ , температуропроводность  $a_N^{(d)}$  и теплоемкость  $C_N^{(d)}$ .

На основе сформированных знаний о предметной области составляется математическая модель ИМ.

Структура фрейма «Измерительный канал» показана на рис. 2.7.



### Рис. 2.7. Структура фрейма «Измерительный канал»

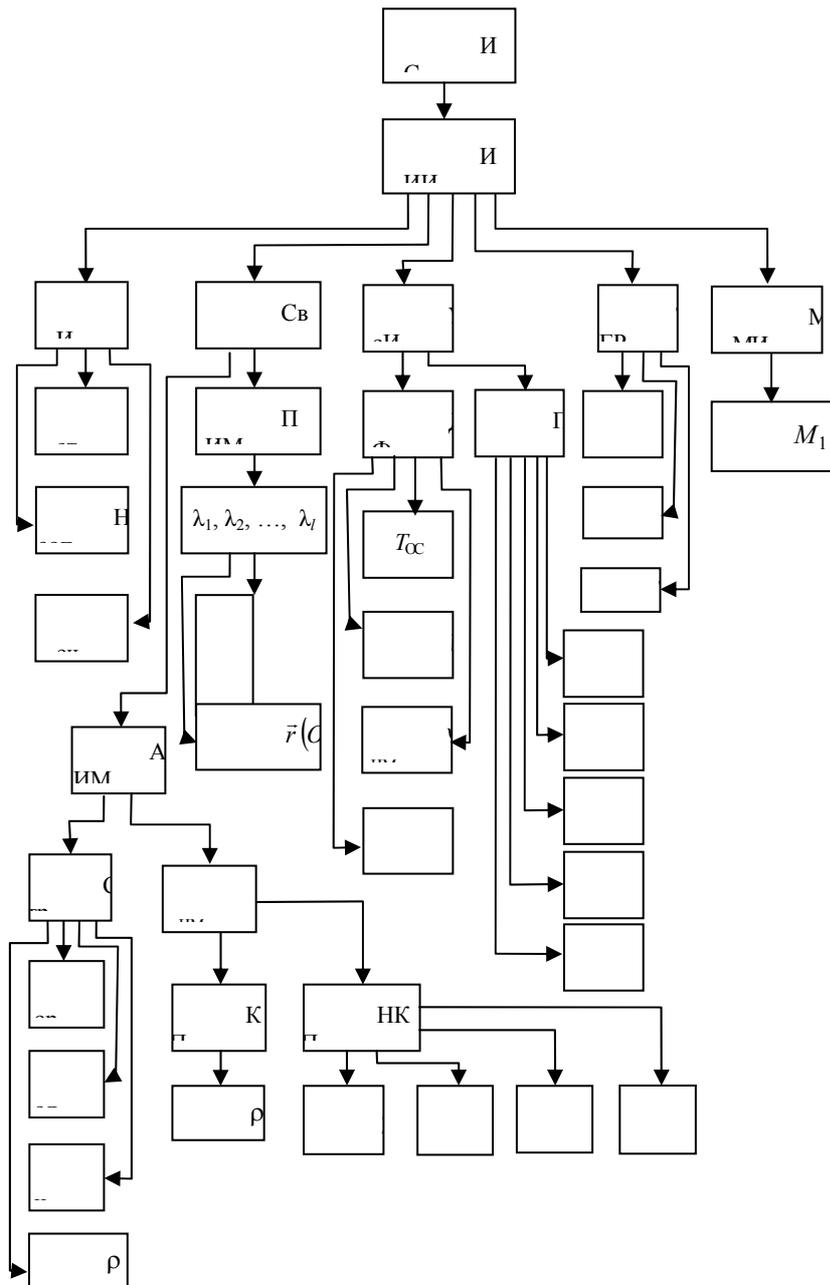
Фрейм-экземпляр «Измерительный канал» (ИК) включает фрейм «Интеллектуальный измерительный зонд» (ИИЗ), который состоит из слотов «Измерительная ячейка 1» (ИЯ1), «Измерительная ячейка 2» (ИЯ2), «Усилитель постоянного тока» (УПТ), «Формирователь тепловых импульсов» (ФТИ). Слот «ИЯ» имеет функциональные назначения «Подключение системы датчиков» (ПСД), «Подключение линейного нагревателя» (ПЛН), «Подключение плоского нагревателя» (ППЛН). Слот «Усилитель постоянного тока» (УПТ) включает значения коэффициентов усиления (КУ)  $K_{1d}, \dots, K_{ld}$ , среднеинтегральные значения температуры (СИЗТ) и значения  $T_{OC}$  ( $3T_{OC}$ ), которые вычисляются из результатов СИЗТ с помощью дифференциального усилителя (ДУ). Слот «Формирователь тепловых импульсов» отображает значения числа тепловых импульсов ( $n$ ), подаваемых на ИМ  $nd_1 \dots nd_N$ , в зависимости от диапазона ( $d$ ) теплопроводности ИМ, а также значения напряжений  $U_{БП1} \dots U_{БПN}$ , которые подключаются к нагревателям ИЯ ИИЗ в соответствии с измерительной ситуацией. Значения слотов фрейма ИИЗ приведены в табл. 2.1.

Фрейм-экземпляр ИК, слоты и их значения позволяют осуществить синтез измерительной цепи для определения ТФС исследуемых материалов.

Структура фрейма «Измерительная ситуация» (ИС) показана на рис. 2.8. Представление знаний во фрейме ИС предполагает осуществление идентификации исходной информации об исследуемом материале.

#### 2.1. Фрейм «Интеллектуальный измерительный зонд»

Имя фрейма: Интеллектуальный измерительный зонд	
имя слота	значение слота
Измерительная ячейка ИЯ1	ИЯ с линейным нагревателем
Измерительная ячейка ИЯ2	ИЯ с плоским нагревателем
Низкий коэффициент усиления	500
Средний коэффициент усиления	700
Высокий коэффициент усиления	1000
Низкое напряжение питания	5 В
Среднее напряжение питания	10 В
Высокое напряжение питания	15 В



**Рис. 2.8. Структура фрейма измерительной ситуации**

Фрейм-экземпляр ИС состоит из фрейма «Идентификация исходной информации» (ИИИ), который включает следующие слоты: «Уровень информации» (УИ), «Свойства исследуемого материала» (СВ<sub>ИМ</sub>), «Условия измерения» (УСИ), «Требования к геометрическим размерам» (ТГР), «Множество методов измерений» (ММИ).

Слот «УИ» имеет значения: «Детерминированность» (Дет), «Неопределенность» (Неопр), «Нечеткость» (Неч).

Слот «СВ<sub>ИМ</sub>» имеет значения «АИМ» и «ПИМ». Априорная информация о ИМ содержит сведения о структуре ИМ (пористость, волокнистость, анизотропность, плотность) и параметрах ИМ. При этом параметры разделяют на два класса: контролируемые параметры ИМ (КП<sub>ИМ</sub>), к которым относятся  $\rho$  и  $\psi$ , и неконтролируемые параметры ИМ (НКП<sub>ИМ</sub>), которые включают  $\lambda_{ИМ}^d$ ,  $R_T$ ,  $T$  и  $W$ . Первичная информация о ИМ, которая определяется по тестовой термограмме, позволяет получить сведения о теплопроводности ИМ  $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_l$ . При этом учитываются расстояния между исследуемыми объектами ( $\bar{D}_0$ ) и меры близости ИМ ( $\bar{r}(O_i, O_j)$ ).

Слот «УСИ» содержит значения воздействующих ДФ ( $T_{OC}$ ,  $W_{IM}$ ,  $\Psi_{IM}$ ,  $R_T$ ) и параметров теплофизических измерений ( $P_{TFI}$ ) для всех диапазонов теплопроводности ИМ: мощности теплового воздействия ( $Q_1^d, Q_2^d, \dots, Q_i^d$ ), количестве воздействующих тепловых импульсов ( $n_1, n_2, \dots, n_i^d$ ), времени достижения установившегося теплового режима ( $\tau_{уст.1}^d, \tau_{уст.2}^d, \dots, \tau_{уст.i}^d$ ) и показателе достижения  $\tau_{уст}$  ( $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_i^d$ ).

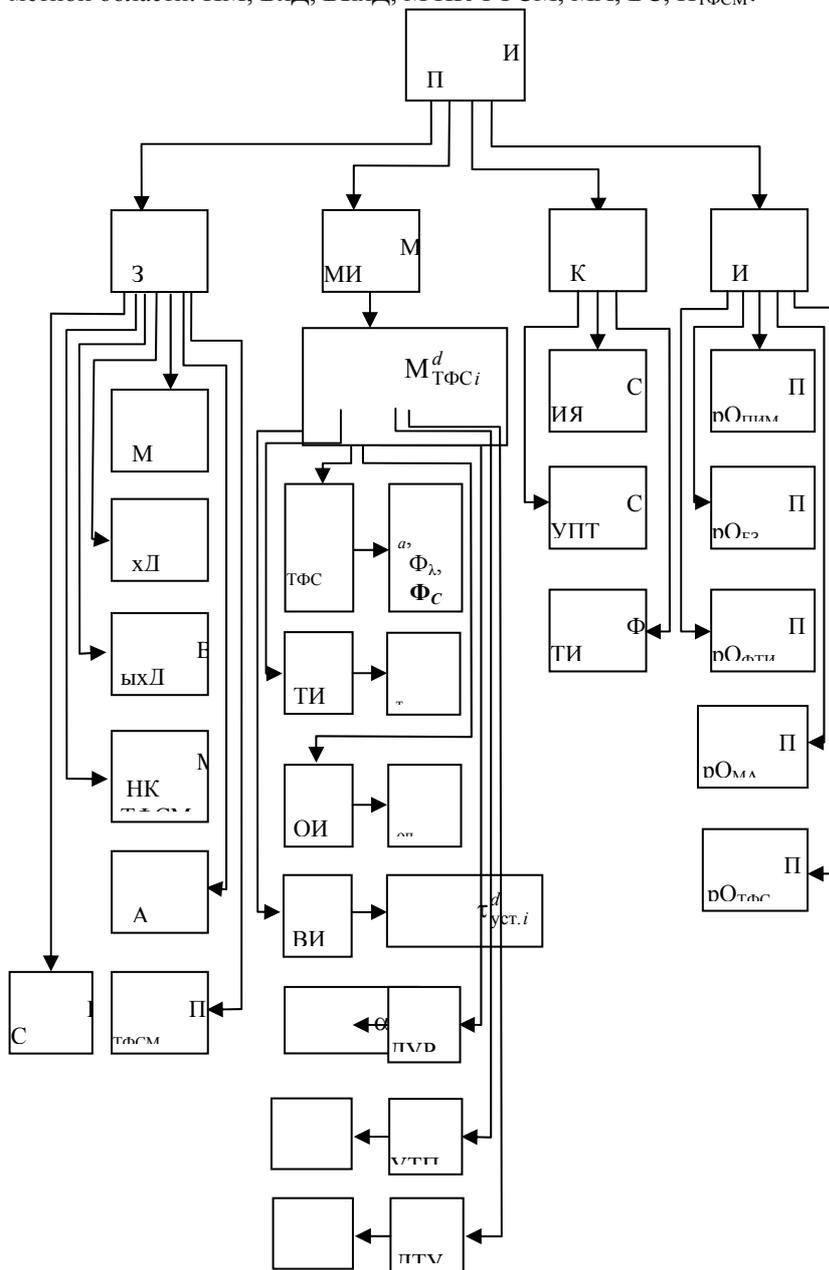
Слот «ГР» включает значения требований к диапазонам теплопроводности ( $D_{1\lambda}, D_{2\lambda}, \dots, D_{i\lambda}$ ) и ограничений по геометрическим размерам ИМ (ГР) и толщине ИМ (Тол).

Слот «ММИ» имеет следующее значение: методы определения ТФС ( $M_{ТФСi}^d$ ) для диапазонов теплопроводности ИМ.

Фрейм-экземпляр «Измерительная процедура» (ИП) представлен на рис. 2.9. В результате обращения к фрейму «ИП» осуществляется оптимизация режима теплофизических измерений. При этом реализуется синтез и формирование алгоритма измерений, синтез измерительной цепи измерительного канала, формирование интеллектуального интерфейса на основе использования базы знаний.

Фрейм-экземпляр ИП содержит фреймы: «База знаний», ММИ, ИК, «Интеллектуальный интерфейс» (ИИ).

Фрейм «БЗ» сформирован из слотов, определяющих знания о предметной области: ИМ, ВхД, ВыхД, М НК ТФСМ, МА, ВС, П<sub>ТФСМ</sub>.



### Рис. 2.9. Структура фрейма измерительной процедуры

Фрейм «МАИ» включает следующие слоты: «Методы измерения ТФСМ» ( $M_{\text{ТФС}i}^d$ ) для заданных диапазонов теплопроводности исследуемых материалов, «Формулы для расчета параметров ТФС» ИМ ( $\Phi_{\text{ТФС}}$ ) (формулы для расчета теплопроводности ( $\Phi_\lambda$ ), температуропроводности ( $\Phi_a$ ) и теплоемкости ( $\Phi_c$ )), «Значения точности измерений» (ЗТИ) с учетом функции потерь точности ( $P_m$ ), «Значения оперативности измерений» (ЗОИ) с учетом функции потерь оперативности ( $P_{\text{оп}}$ ), «Значения времени измерений» (ЗВИ) с указанием времени достижения установившегося значения температуры в области контакта ИИЗ и ИМ ( $\tau_{\text{уст}}^d$ ) для каждого диапазона теплопроводности (ДТ), «Значения показателей достижения установившегося теплового режима» (ЗДУР) в области контакта ИИЗ и ИМ для всех ДТ ИМ ( $\alpha_i^d$ ), «Значение показателя уравнивания (усреднения) температуры подложки ИИЗ» (ПУТП)  $\Delta\epsilon_i^d$ .

Фрейм «ИК» имеет слоты: «Синтез измерительной ячейки» ИИЗ для исследуемых ДТ ИМ (ИЯ) $_i^d$ , «Синтез измерительных цепей усилителей постоянного тока» ДТ ИМ (УПТ) $_i^d$  и «Формирование тепловых импульсов» (ФТИ), подробно описанные во фрейме ИК, структура которого показана на рис. 2.7.

Фрейм «Интеллектуальный интерфейс» (ИИ) включает следующие слоты: «Программное обеспечение для получения ПИМ» (ПрО<sub>ПИМ</sub>), «Программное обеспечение для использования необходимых знаний из БЗ» (ПрО<sub>БЗ</sub>), «Программное обеспечение для управление теплофизическими измерениями» (ПрО<sub>ТФИ</sub>), «Программное обеспечение для проведения метрологического автосопровождения результатов измерения ТФСМ» (ПрО<sub>МА</sub>), «Программное обеспечение для расчета и вывода результатов определения ТФСМ (ПрО<sub>ТФСМ</sub>).

Структура фрейма «Метрологическое обеспечение» (МО) показана на рис. 2.10.

Фрейм-экземпляр МО состоит из фреймов: «Способ метрологического обеспечения» (СМО), «Метрологическое автосопровождение результатов измерения ТФСМ» (МАС), «Методы обработки информации» (МОИ), «Определяемые погрешности измерений» (ОП), «Меры доверия к результатам измерения» (МД).

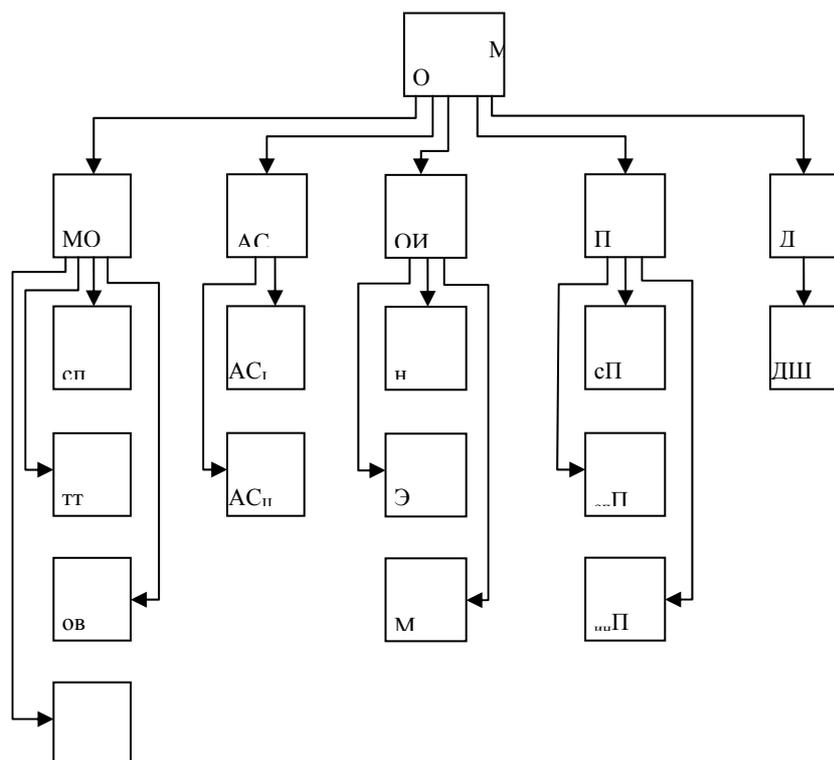
Фрейм «СМО» содержит следующие слоты: «Испытание» (Исп), «Проверка» (Пов), «Аттестация» (Атт), «Калибровка» (К).

Фрейм «МАС» включает слоты «МАС<sub>I</sub>», осуществляющий оценку характеристик погрешностей результатов прямых измерений на выходе измерительного канала с учетом структурно-параметрической адаптации к измерительной ситуации, и МАС<sub>II</sub>, выполняющий оценку характеристик погрешности результатов измерений с учетом характеристик погрешностей результатов прямых измерений и реализованного ИИИС алгоритма обработки измерительной информации.

Фрейм «МОИ» образует слоты, содержащие информацию о способах обработки измерительной информации о ТФСМ: «Аналитический» (Ан), «Метрологического эксперимента» (МЭ), «Эмитационное моделирование» (ЭМ).

Фрейм «ОП» представляет информацию о слотах, содержащих формулы для расчета погрешностей и их характеристик: «Основная погрешность» (ОсП), «Дополнительная погрешность» (Д<sub>оп</sub>П), «Динамическая погрешность» (Д<sub>дин</sub>П).

Фрейм «МД» показывает одну из методик оценки достоверности полученных результатов при определении мер доверия к измерительной информации на основе критерия Демстера-Шафера, изложенного в слоте «Критерий Демстера Шафера» (КДШ).



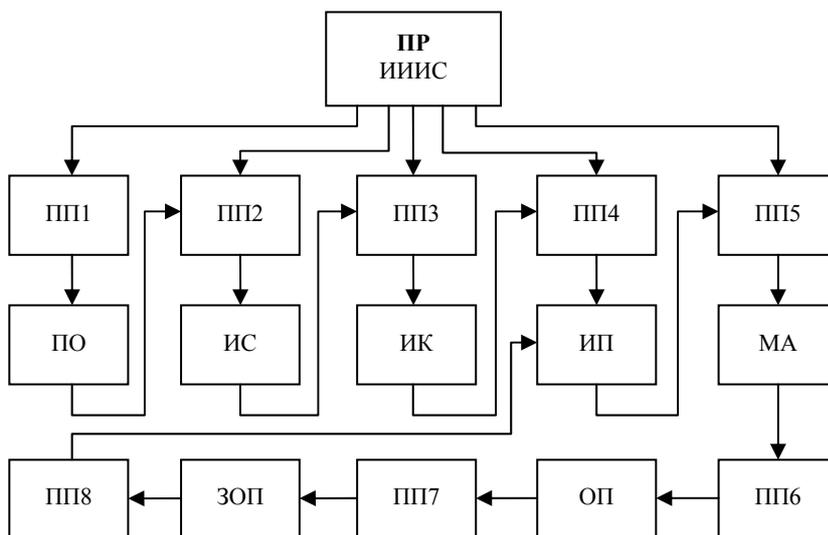
**Рис. 2.10. Структура фрейма метрологического обеспечения**

Целью представления знаний во фрейме-экземпляре «МО» является получение достоверных результатов определения ТФСМ и проведение измерений с прогнозируемой погрешностью.

Структура фрейма-экземпляра «Принятие решений в ИИИС» представлена на рис. 2.11.

Фрейм-экземпляр «ПР ИИИС» составлен из протофреймов, составляющих обобщенную структуру представления знаний в ИИИС НК СМ (рис. 2.5): ПО, ИС, ИК, ИП, МА. Получение знаний из этих протофреймов и обращение к соответствующему протофрейму осуществляется через присоединенные процедуры ПП1 ... ПП5. Особенностью структуры фрейма-экземпляра «ПР ИИИС» является последовательная связь между фреймами с указанием очередности обращения к фреймам. Заключительным этапом в этой процедуре является обращение к фрейму «МА» через процедуру ПП5, которая реализует обращение через ПП6 к слоту «ОП» фрейма «МА». Далее процедура ПП7 позволяет получить значения слота «Основная погрешность» – «Заданная относительная погрешность» (ЗОП), с которой происходит сравнение погрешности результатов определения ТФС ИМ. Присоединенная процедура ПП8 осуществляет обращение к протофрейму «Измерительная процедура».

Фрейм-экземпляр «ПР ИИИС» служит для формирования знаний по выбору алгоритма НК ТФСМ.



**Рис. 2.11. Структура фреймового представления знаний для принятия решений в ИИИС**

Рассмотренные структуры фреймового представления знаний в ИИИС содержат присоединенные процедуры, позволяющие выбрать соответствующий протофрейм, значения слотов для организации фрейма-экземпляра.

Создание базы знаний позволяет хранить и пополнять информацию о исследуемых материалах, методах контроля и измерения СМ, алгоритмах и измерительных процедурах, методах метрологического анализа для ряда предметных областей. Постоянное развитие базы знаний с учетом информации пользователя и эксперта является поддержкой функции универсальности интеллектуальных информационно-измерительных систем неразрушающего контроля свойств материалов. На основе данных и знаний, формирующихся в базе знаний, осуществляется принятие оптимальных решений при НК СМ в условиях неопределенности.

## 2.6. ПРИНЯТИЕ РЕШЕНИЯ В ИИИС

Наличие неопределенностей при получении, формировании и представлении знаний вызывает определенные трудности при принятии решений. В ИИИС во многом сложнее оценивать измерительную ситуацию, воспринимать события и явления в предметной области, решать задачи НК СМ при наличии нечеткого представления знаний. В этих условиях при описании математическими моделями ИМ, измерительной ситуации, принятии решений и других возникает проблема недостатка информации, который возникает из-за неполноты информации, описывающей ИМ, из-за неформализованного представления информации, а также из-за нечеткости информации, появляющейся в условиях неопределенности [18].

Одно из направлений исследований в решении проблем неопределенности связано с созданием математических методов для описания нечетко определенных предметных областей. Трудности при этом возрастают, если существует лингвистическая неопределенность при описании предметной области. В подобных ситуациях широкое применение находит аппарат нечеткой логики Л. Заде [19].

Принятие решений в ИИИС в соответствии с приведенной архитектурой в третьем разделе осуществляется следующим образом: изложение решаемой задачи поступает в блок логического вывода, который, используя информацию из базы знаний, формирует рекомендации по решению поставленной задачи.

Фреймовое представление знаний в ИИИС позволяет наиболее полно описать ИМ, измерительные ситуации, предметные области и другие компоненты со всей совокупностью присущих им свойств. Фреймовый подход позволяет более последовательно использовать не-

которые важные механизмы представления знаний и, в первую очередь, процедурные знания. Поскольку фреймы представляют общую базу знаний в ИИИС, они используются в реализации операции сопоставления в БЛВ.

В процессе моделирования принятия решений при НК СМ необходимо включить следующие этапы: создание экземпляра-фрейма (поиск фрейма), выполнение активации фреймов (выбор для данной измерительной ситуации при НК СМ), организация вывода.

Обобщенная модель для формализованного описания принятия решений в ИИИС представлена в разделе 1.5.

Решением задачи (целью) принятия решений в ИИИС является минимизация функционала, определяющего потери оперативности и точности ИИИС, которые являются основными показателями эффективности работы ИИИС

$$F(\Pi_T, \Pi_{оп}, O_i) = [\Pi_T(M_i, U_i, \Psi_i, K_i) + \Pi_{оп}(O_i, S_i, M_i, U_i, Z_i)] \rightarrow \min_{M_i, U_i, S_i}$$

где  $F$  – функционал, зависящий от методов НК ТФСМ ( $M_i$ ), вида ИМ ( $O_i$ ), измерительных ситуаций ( $U_i$ ), критериев оценки результатов измерений ( $K_i$ ), исходных состояний ИИИС ( $Z_i$ ), структур ИИИС ( $\Psi_i$ ), стратегий поиска оптимальных решений ( $S_i$ ).

При принятии решений в ИИИС на каждом этапе функционирования проводится анализ достижения поставленной цели. Если цель не достигнута, то рассматриваются новые варианты решения, и процесс решения повторяется с учетом полученной информации на предыдущем этапе измерения. Таким образом, оптимальное принятие решений сводится к выбору такого алгоритма функционирования ИИИС, при котором будет максимальным критерий технической эффективности ИИИС, зависящий от стратегий поиска оптимальных решений. Это условие выполнимо при минимизации функционала  $F(\Pi_T, \Pi_{оп}, O_i)$ :

$$\begin{aligned} F[(\Pi_{Ti}, \Pi_{Tk}), (\Pi_{опi}, \Pi_{опк}), (O_i, O_k)] = \\ = [\Pi_T((M_i, M_k), (U_i, U_k), (\Psi_i, \Psi_k), (K_i, K_k)) + \\ + \Pi_{оп}((O_i, O_k), (S_i, S_k), (M_i, M_k), (U_i, U_k), (Z_i, Z_k))] \rightarrow \min_{M_i, U_i, S_i} \end{aligned}$$

Принятие решений в ИИИС позволяет оценить эффективность функционирования ИИИС. Эффективность согласно этой модели определяется как функция переменных, описывающих свойства ИМ, условия и методы измерений, структуры ИИИС, критерии оценки результатов НК СМ.

### 2.6.1. Задачи принятия решения в ИИИС в условиях неопределенности

Принятие решений в ИИИС направлено на процесс поиска решения измерительной задачи НК СМ и определения оптимального алгоритма измерений, стратегий поиска, измерительных процедур на каждом этапе НК СМ при известном разделении информации на детерминированную, случайную и нечеткую.

Структура задачи принятия решения представлена в табл. 2.2. Принятие решение в ИИИС осуществляется в нечеткой среде, т.е. ТФСМ определяется при нечетко заданной априорной, апостериорной и первичной информации о ИМ, измерительной ситуации. В ИИИС используется фреймовое представление знаний, так как его объектно-ориентированная структура способствует осуществлению интеллектуализации процесса измерений свойств материалов.

В качестве стратегий принятия решений выбран полный перебор из существующих методов НК СМ, измерительных ситуаций, структур ИИИС и т.д. и метод логического вывода на основе применения теории нечетких множеств и функций принадлежности. Оценка принятия решения (достоверности полученных результатов НК СМ) выполнена с использованием критерия Демстера-Шафера.

При функционировании ИИИС необходимо принимать решения при рассмотрении следующих задач: формирование и выбор модели исследуемого материала, метода контроля свойств материалов, выбор параметров измерительной ситуации, оценка качества НК СМ и эффективности ИИИС.

## 2.2. Структура задачи принятия решения

Информация для принятия решения	Принятие решения
Нечеткая	В нечеткой среде
Область применения решения	Контроль, измерение, диагностика
Представление знаний	С использованием декларативных и процедурных знаний, фреймовое
Стратегия принятия решения	Полный перебор, логический вывод
ДФ, методы НК СМ и МА, ИМ, измерительная ситуация, синтез измерительной цепи	На основе имеющихся сведений в БЗ
Оценка решения	Критериальная

В качестве примера рассмотрим этапы принятия решений в ИИИС неразрушающего контроля теплофизических свойств материалов.

1. Принятие решения о выборе модели исследуемого материала (см. раздел 1.2). Для этого на основе теории нечетких множеств определяются функции принадлежности.

а) Определение класса ИМ. Определение ФП теплопроводности  $\lambda$  нечетких множеств.

Пусть  $D_{\lambda N}$  – полное множество значений  $\lambda$  в диапазонах теплопроводности  $N$ -исследуемых материалов. Нечеткое подмножество  $f_{\lambda p}$   $p$ -диапазонов теплопроводности, которое далее будем называть нечеткое множество, соответствующих классов ИМ определяется через функцию принадлежности [20]

$$\mu_{f_{\lambda p}}(d_{\lambda i}), \quad d_{\lambda i} \in D_{\lambda N}.$$

Эта функция отображает значения  $i$ -й теплопроводности ИМ  $p$ -го диапазона теплопроводности множества  $D_{\lambda N}$  на множестве вещественных чисел отрезка  $[0, 1]$ , которые указывают степень принадлежности каждого элемента нечеткому множеству  $f_{\lambda p}$ .

Если полное множество  $D_{\lambda N}$  состоит из конечного числа значений теплопроводности  $d_{\lambda i}$ ,  $i=1, 2, \dots, N$ , то нечеткое множество  $f_{\lambda p}$  можно представить в следующем виде:

$$f_{\lambda p} = \{ \mu_{f_{\lambda p}}(d_{\lambda 1})/d_{\lambda 1}, \mu_{f_{\lambda 1}}(d_{\lambda 2})/d_{\lambda 2}, \dots, \mu_{f_{\lambda p}}(d_{\lambda N})/d_{\lambda N} \},$$

где символ « / » показывает, что значение  $\mu_{f_{\lambda p}}(d_{\lambda i})$  относится к  $i$ -значению теплопроводности ИМ.

Пусть  $D$  – множество значений теплопроводности. В рассматриваемом примере из табл. 1.2 обозначим значения «низкий» теплопроводности ( $d_{\lambda 1}$ ) нечетким множеством  $f_{\lambda 1}$ , значения «средний» теплопроводности ( $d_{\lambda 2}$ ) – нечетким множеством  $f_{\lambda 2}$  и значения «высокий» теплопроводности ( $d_{\lambda 3}$ ) – нечетким множеством  $f_{\lambda 3}$ . Эти нечеткие множества являются подмножествами множества  $D$ .

Функции принадлежности  $i$ -х значений теплопроводности, приведенных в табл. 1.2, нечетких множеств имеют следующий вид:

$$f_{\lambda 1} = \mu_{f_{\lambda 1}}(d_{\lambda 1}) = 1/0; 1/0,05; 0,8/0,1; 0,3/0,2;$$

$$f_{\lambda 2} = \mu_{f_{\lambda 2}}(d_{\lambda 2}) = 0,5/0,2; 1,0/0,35; 0,5/0,5;$$

$$f_{\lambda 3} = \mu_{f_{\lambda 3}}(d_{\lambda 3}) = 0,4/0,5; 0,8/0,6; 1/0,7; 1/0,8; 1/0,9.$$

б) Определение ФП температуропроводности  $a$  нечетких множеств. ФП выполняется аналогично формированию  $\mu_{f_{\lambda p}}$ :

$$\mu_{f_{ap}}(d_{ai}), \quad d_{ai} \in D_{aN},$$

где  $D_{aN}$  – полное множество значений  $a$   $p$ -диапазонов температуропроводности  $N$ -исследуемых материалов,  $d_{ai}, i=1, 2, \dots, N$  – конечное число значений температуропроводности.

Нечеткое множество значений  $f_{ap}$  формируется следующим образом:

$$f_{ap} = \{ \mu_{f_{ap}}(d_{a1})/d_{a1}, \mu_{f_{ap}}(d_{a2})/d_{a2}, \dots, \mu_{f_{ap}}(d_{aN})/d_{aN} \}.$$

в) Определение ФП теплоемкости  $C$ , плотности  $\rho$ , шероховатости поверхности ИМ  $\psi$ , контактного сопротивления  $R_T$ , температуры ИМ  $T$ , влажности  $W$  ИМ, области допустимых значений ДФ  $D_{ДФ}$  нечетких множеств.

2. Принятие решений о выборе параметров измерительной ситуации.

а) Определение ФП метода НК ТФСМ ( $M$ ) нечетких множеств

$$\mu_{f_M}(d_{Mi}), \quad d_{Mi} \in D_{MJ}.$$

б) Определение ФП значений  $\tau_{\text{уср}}$  – времени нахождения ИИЗ на вспомогательном образце, нечетких множеств.

в) Принятие решений о выборе времени достижения установившегося теплового режима в области контакта ИИЗ и ИМ  $\tau_{\text{уср}}$ .

г) Определение ФП диапазона коэффициентов усиления измерительного усилителя нечетких множеств.

д) Определение ФП диапазона напряжений, подаваемых с блока питания БП на нагреватель ИИЗ, нечетких множеств.

е) Принятие решения о выборе показателя достижения установившегося теплового режима  $\beta$  в области контакта ИИЗ и ИМ.

ж) принятие решения о структуре ИИИС. Функция принадлежности структуры нечетких множеств.

3. Принятие решений о качестве НК ТФСМ и эффективности ИИИС.

а) Принятие решения о принадлежности относительной погрешности результатов измерения ТФСМ ( $\delta_\lambda, \delta_a$ ) к диапазону допустимых относительных погрешностей  $\delta_{\text{доп}\lambda}, \delta_{\text{доп}a}$ .

б) Принятие решения о выполнении классификации ИМ (правильная или неправильная).

в) Принятие решения о потерях точности  $\Pi_T$  и оперативности  $\Pi_{\text{оп}}$  (см. раздел 3.3). При этом выполняется оптимизация критерия оптимальности – минимизация функционала, комплексно учитывающего потери точности и оперативности.

г) Принятие решения об оценке достоверности полученных результатов НК ТФСМ.

Для исключения ошибочных измерений принимается решение о значениях мер доверия к результатам измерения, которые определяются с помощью метода Демпстера-Шафера (см. раздел 2.7).

Применение методов искусственного интеллекта позволяет принимать оптимальные решения в ИИИС, что способствует осуществлению поставленной цели – повышению оперативности, точности НК ТФСМ и эффективности ИИИС.

## 2.7. ОБЕСПЕЧЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ ИИИС

Вопросы обеспечения отказоустойчивости к ошибочным измерениям интеллектуальных информационно-измерительных систем на примере систем неразрушающего контроля теплофизических свойств материалов, устойчивых при функционировании в условиях воздействия дестабилизирующих факторов рассмотрены в [21]. Результаты измерений предлагается сопровождать значениями мер доверия, получаемым на основе метода Демпстера-Шафера.

Информационно-измерительные системы неразрушающего контроля теплофизических свойств материалов широко используются на предпри-

ятиях, производящих теплоизоляционные, полимерные и многие другие виды материалов для определения качества выпускаемой продукции. Как при массовом производстве продукции, так и при проведении исследовательских работ по созданию новых материалов, основными требованиями к системам НК СМ являются гарантированная точность получаемых результатов и высокая производительность (оперативность). Опыт эксплуатации систем НК СМ показывает, что основная часть их отказов вызывается нарушениями работоспособности технических средств и невыполнением требований к точности выполняемых измерений. За последние годы надежность ИИС по отношению к отказам технических средств значительно повышена за счет введения избыточности для функциональных блоков, включая измерительные зонды, усилители, источники питания и т.д. Для наиболее ответственных блоков используется горячее резервирование.

Вместе с тем значительного прогресса в повышении надежности по отношению к метрологическим отказам, связанным с большими погрешностями в процессе измерения, не достигнуто. Ошибки в определении параметров свойств материалов могут приводить к тяжелым последствиям, авариям и даже катастрофам, например, если окажется, что тепловая защита космического аппарата при его снижении не соответствует задаваемым требованиям.

Известно, что случайная составляющая погрешности может быть уменьшена за счет проведения серии измерений, однако при этом, во-первых, снижается оперативность, во-вторых, это не гарантирует от больших значений систематической погрешности, вызываемых влиянием различных дестабилизирующих факторов. К таким ДФ, при использовании, например, методов НК ТФС твердых материалов, в первую очередь относятся шероховатость поверхности исследуемого материала, на которую устанавливается измерительный зонд, величина контактного термосопротивления, размеры и форма образца, неоднородность структуры исследуемого материала и др. [14].

Поэтому с целью повышения устойчивости к ошибочным измерениям предлагается в системах НК СМ использовать методы искусственного интеллекта для уменьшения погрешности и определения степени достоверности получаемых результатов [21].

Предложенная структура интеллектуальных информационно-измерительных систем НК СМ реализует достаточно сложный алгоритм функционирования (см. рис. 2.2) [22].

*Определение 1.* В предположении исправности технических средств под отказом ИИИС будем понимать результат измерения параметров СМ с погрешностью выше допустимой (указанной в паспорте на систему). Для краткости такое измерение будем называть ошибочным или неправильным.

*Определение 2.* ИИИС, в которых реализуется идентификация ДФ, нейтрализуется их влияние корректирующими поправками и выдается информация о достоверности результатов измерения, будем называть ИИИС, устойчивыми к ошибочным измерениям (УОИ). Основная цель таких систем – обеспечить отсутствие ошибочных измерений, либо, в крайнем случае, дать информацию пользователю о степени достоверности получаемых результатов.

Таким образом, в отличие от обычных ИИС, определяющих конкретные значения характеристик, результат измерения, полученный ИИИС, выдается в виде кортежа  $\langle (q_{i1}, q_{i2}, \dots, q_{im_i}); \{m_k(Z)\} \rangle$ , где  $\{m_k(Z)\}$  – множество мер доверия для всех гипотез  $z$  из множества  $Z$  по  $k$  источникам свидетельств.

Алгоритмическое обеспечение ИИИС УОИ включает:

- математическую модель процесса теплопереноса;
- аппроксимирующие зависимости результатов определения теплопроводности исследуемых материалов от воздействующих ДФ;
- соотношения для расчета мер доверия к получаемым результатам на основе метода Демпстера-Шафера [23].

Вопросы влияния ДФ достаточно подробно изложены в [14]. С учетом этих факторов определение мер доверия к результатам измерения производится следующим образом.

Формируется пространство исходов (множество гипотез, или область анализа)  $Q = \{H, \Psi, S, R_T\}$ , здесь  $H$  – измерения в нормальных условиях (при отсутствии воздействия ДФ);  $\psi$  – шероховатость поверхности превышает допустимую;  $S$  – неоднородность структуры ИМ;  $R_T$  – контактное термосопротивление, зависящее от шероховатости поверхности, неоднородности структуры и теплопроводности ИМ.

Если компоненты множества гипотез  $Q$  являются взаимно-исключающими, набор гипотез – исчерпывающим и функции доверия  $m_1(X)$ ,  $m_2(Y)$  сформированы по независимым источникам свидетельств в пределах пространства  $Q$ , то значение функции доверия гипотезы  $A \in 2^Q$ , т.е.  $m_3(A)$  с учетом двух свидетельств определяется по формуле Демпстера-Шафера

$$m_n(Z) = \frac{\sum_{X \cap Y = Z} m_1(X) \cdot m_2(Y)}{1 - \sum_{X \cap Y = \emptyset} m_1(X) \cdot m_2(Y)}. \quad (2.1)$$

В качестве примера применения правила Демпстера-Шафера рассмотрим определение мер доверия к результатам измерения теплофизических свойств теплоизоляционных материалов при воздействии ДФ.

Согласно правилу Демпстера-Шафера меры доверия  $m_1(X)$  и  $m_2(Y)$  к результатам измерения определяются на совокупности пространства гипотез  $Q = \{H, \Psi, S, R_T\}$  в соответствии с табл. 2.3. Значения  $m_1(H)$  и  $m_1(Q)$  задаются перед началом измерений оператором. Они отражают состояние технологического процесса. Если в процессе произошли изменения, например, изменилось сырье или оборудование, то мера доверия  $m_1(H)$  может уменьшена. Значения  $m_2(H)$ ,  $m_2(R_T)$ ,  $m_2(S)$  и т.д. могут браться из базы знаний или задаваться специалистом в этой предметной области.

**2.3. Таблица пересечений  $X \cap Y = Z$**

$m_1(X) \backslash m_2(Y)$	$H(0, 4)$	$R_T(0, 2)$	$S(0, 1)$	$\psi(0, 1)$	$Q(0, 2)$
$H(0, 9)$	$H(0, 36)$	$\emptyset(0, 18)$	$\emptyset(0, 09)$	$\emptyset(0, 09)$	$H(0, 18)$
$Q(0, 1)$	$H(0, 04)$	$R_T(0, 02)$	$S(0, 01)$	$\psi(0, 01)$	$Q(0, 02)$

**Пример 1.** Пусть рассматриваются два свидетельства, первое  $X = \{H, Q\}$  с  $m_1(H) = 0,9$ ,  $m_1(Q) = 0,1$  и второе  $Y = \{H, R_T, S, \Psi, Q\}$  с  $m_2(H) = 0,4$ ,  $m_2(R_T) = 0,20$ ,  $m_2(S) = 0,2$ ,  $m_2(\Psi) = 0,1$ ,  $m_2(Q) = 0,1$ . На основании данных, представленных в таблице пересечений  $X \cap Y = Z$  (см. табл. 2.1), по формуле (2.1) рассчитываются меры доверия, учитывающие оба свидетельства, т.е.

$$m_3(H) = \frac{0,58}{0,64} = 0,906; \quad m_3(R_T) = 0,031;$$

$$m_3(S) = m_3(\Psi) = 0,016; \quad m_3(Q) = 0,031.$$

Таким образом, с учетом двух свидетельств мера доверия  $m_1(H)$  практически сохранила свое значение.

Существенным недостатком формулы (2.1) является то, что она не учитывает возможность разной доверенности свидетельств.

**Утверждение 1.** Если одно из свидетельств в формуле Демпстера имеет доверенность меньше другого свидетельства и эта доверенность характеризуется показателем  $C_i < 1$ , то данное обстоятельство можно учесть при расчете мер доверия, учитывающих оба свидетельства, по формулам

$$m_3(Z) = \frac{\sum_{X \cap Y=Z} m_1(X/C_1)m_2(Y)}{1 - \sum_{X \cap Y=\emptyset} m_1(X/C_1)m_2(Y)}, \text{ если } C_1 < 1, C_2 = 1; \quad (2.4)$$

$$m_3(Z) = \frac{\sum_{X \cap Y=Z} m_1(X)m_2(Y/C_2)}{1 - \sum_{X \cap Y=\emptyset} m_1(X)m_2(Y/C_2)}, \text{ если } C_1 = 1, C_2 < 1, \quad (2.3)$$

здесь

$$m_i(v/C_i) = \frac{d_i m_i(v)}{d_i m_i(v) + m_i(Q)}, \quad m_i(Q/C_i) = \frac{m_i(Q)}{d_i m_i(v) + m_i(Q)}, \quad (2.4)$$

$$d_i = \frac{C_i m_i(Q)}{1 - C_i m_i(V \setminus Q)}; \quad i=1, 2; \quad v \in \{V \setminus Q\}, \quad V = X, \text{ если } i=1, \text{ и } V = Y, \text{ если } i=2.$$

Покажем применение формул (2.2) – (2.4) на примере.

**Пример 2.** Пусть дополнительно к условиям примера 1 известно, что  $C_1 = 0,5$ .

В этом случае

$$d_1 = \frac{C_1 m_1(Q)}{1 - C_1 m_1(H)} = \frac{0,5 \cdot 0,1}{1 - 0,5 \cdot 0,9} = 0,091;$$

$$m_1(H/C_1) = \frac{d_1 m_1(H)}{d_1 m_1(H) + m_1(Q)} = \frac{0,091 \cdot 0,9}{0,091 \cdot 0,9 + 0,1} = 0,45;$$

$$m_1(Q/C_1) = \frac{m_1(Q)}{d_1 m_1(H) + m_1(Q)} = \frac{0,1}{0,1819} = 0,55.$$

По данным табл. 2.4, используя формулы (2.1) – (2.4), получаем

$$m_3(H) = \frac{0,49}{1 - 0,18} = 0,6, \quad m_3(R_T) = m_3(Q) = \frac{0,11}{0,82} = 0,133;$$

$$m_3(S) = m_3(\Psi) = \frac{0,055}{0,82} = 0,067.$$

Таким образом, скорректированный расчет показывает, что мера доверия  $m_3(H)$  существенно уменьшилась по сравнению с  $m_1(H) = 0,9$  и значительно возросли  $m_3(R_T)$ ,  $m_3(S)$ ,  $m_3(\Psi)$ , т.е. дестабилизирующие факторы оказывают существенное влияние на результат измерения. Свидетельства определяются по каждой гипотезе по рекомендациям эксперта. Если свидетельства незначительны по какому-то свидетельству, то надо ввести поправку в результат измерения, чтобы мера доверия повысилась.

**2.4. Таблица пересечений  $X \cap Y = Z$**

$m_2(Y)$ $m_1(X/C_1)$	$H(0, 4)$	$R_T(0, 2)$	$S(0, 1)$	$\Psi(0, 1)$	$Q(0, 2)$
$(H/C_1)(0, 45)$	$H(0, 18)$	$\emptyset(0, 09)$	$\emptyset(0, 045)$	$\emptyset(0, 045)$	$H(0, 09)$
$(Q/C_1)(0, 55)$	$H(0, 22)$	$R_T(0, 11)$	$S(0, 055)$	$\Psi(0, 055)$	$Q(0, 11)$

Предложенный способ определения мер доверия к результатам измерения СМ, наряду с автоматической коррекцией результатов измерения по аппроксимирующим зависимостям результатов определения параметров ИМ от воздействующих ДФ, поэтапным метрологическим анализом результатов измерения с целью получения измеряемых параметров СМ с допустимой погрешностью способствуют повышению устойчивости системы к ошибочным измерениям, а следовательно, и обеспечению надежности ИИИС.

## 2.8. ПОДХОД К ИНТЕЛЛЕКТУАЛИЗАЦИИ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

При формировании подхода к интеллектуализации ИИС поставлены и решены задачи интеллектуализации, созданы математические модели компонентов и процессов при проектировании ИИИС, разработана архитектура интеллектуальных информационно-измерительных систем. В отличие от существующих ИИИС предлагаемая архитектура характеризуется универсальностью и многофункциональностью. Эти свойства системы реализуются применением интеллектуального датчика, содержащего в своей структуре набор измерительных ячеек, которые используются в зависимости от функционального назначения системы и рассматриваемой предметной области. Кроме того, база знаний ИИИС выполнена на основе микроконтроллеров, содержащих информацию по ряду предметных областей: о методах измерения, моделях исследуемых материалов и изделий, алгоритмах и измерительных процедурах, априорной и текущей информации, аппроксимирующих зависимости и методах метрологического анализа результатов измерений параметров свойств исследуемых материалов и изделий.

Разработаны основные положения (этапы) подхода к интеллектуализации информационно-измерительных систем контроля свойств материалов, представленные на структурной схеме (рис. 2.12).

Для решения поставленных задач и проблем при контроле свойств материалов в ИИС применяются методы искусственного интеллекта, приведенные на структурной схеме (рис. 2.13).

В основу функционирования интеллектуальной системы положено: представление знаний, приобретение знаний и использование полученных знаний.

Решение задач выбора метода контроля свойств материалов, классификации исследуемых материалов, распознавания образов, разработанные модели предметной области, исследуемых материалов, интеллектуальных информационно-измерительных систем и принятия решений в ИИИС, структура ИИИС, разработанная база знаний, интеллектуальный датчик завершают решение задач подхода к интеллектуализации информационно-измерительных систем.

### **3. ИНТЕЛЛЕКТУАЛИЗАЦИЯ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ТВЕРДЫХ МАТЕРИАЛОВ**

---

---

В данной главе выполнен анализ ДФ, воздействующих на ИИИС НК ТФСМ, и определены основные ДФ. Приведены методы, позволяющие устранить влияние ДФ на достоверность результатов измерения. Рассмотрены разработанные методы НК ТФСМ, интеллектуальный измерительный зонд и интеллектуальная информационно-измерительная система.

#### **3.1. АНАЛИЗ ДЕСТАБИЛИЗИРУЮЩИХ ФАКТОРОВ, ВОЗДЕЙСТВУЮЩИХ НА ИИИС НК ТФСМ**

При проектировании ИИИС НК ТФСМ, проведении контроля ТФСМ в условиях производства анализ ДФ, воздействующих на процесс измерения в ИИИС, является важной проблемой, решение которой позволит обеспечить заданный метрологический уровень определения ТФСМ.

Анализ дестабилизирующих факторов, воздействующих на ИИИС проводится с целью выявления воздействующих факторов, оказывающих влияние на работоспособность отдельных структурных блоков ИИИС. На основе анализа дестабилизирующих факторов определяются методы уменьшения составляющих общей погрешности основных блоков ИИИС [14].

ИИИС НК ТФСМ включает следующие основные блоки и устройства: ИИЗ – интеллектуальный измерительный зонд; МК – микроконтроллер; ИВУ – интеллектуальное вычислительное устройство; БЗ – база знаний; СДК – система допускаемого контроля; БПР – блок принятия решений.

Основными дестабилизирующими факторами, воздействующими на ИИЗ (термозонд), являются изменение температуры, давления и влажности окружающей среды, контактного термосопротивления в области измерения (области контакта термозонда и исследуемого материала), теплоемкости нагревателя, теплоотдачи в области измерения, изменение расположения элементов термоприемника в термозонде, влияние шероховатости поверхности объекта, а также воздействующие помехи на измерительный преобразователь.

Помехой считается любой электрический сигнал в цепях первичных измерительных преобразователей (ПИП), отличный от полезного [6]. Помеха включает внутренние источники шумов, возникающие от термоэффекта и гальванического взаимодействия в местах соединений участков цепи, от теплового шума в различных элементах цепи, от собственных шумов в источниках полезных сигналов. На работающую ИИИС действуют также излучения от внешних источников. Указанные помехи создают электрические и магнитные поля, которые из-за наличия индуктивных, емкостных и резистивных связей способствуют возникновению на различных участках преобразования полезного сигнала паразитной разности потенциалов и протеканию токов по элементам измерительных и информационных цепей.

Влияние воздействующих помех на ПИП и результаты измерения ТФСМ можно устранить с помощью инструментальных и алгоритмических методов. Инструментальными методами являются: экранирование, заземление, изоляция, регулировка значения полного сопротивления схемы, выбор кабеля и др. К алгоритмическим методам относятся: линейная и нелинейная фильтрация; отбраковка аномальных измерений и др.

Дестабилизирующим фактором, воздействующим на термозонд, является влияние теплоемкости нагревателя на результаты измерения.

При контроле температуры в области измерения термоприемник может также нарушать первоначальное распределение температур в контролируемом объекте [24]. Вследствие этого при неблагоприятных условиях измерения может иметь место методическая погрешность измерения температуры и температура чувствительного элемента термоприемника будет отличаться от действительной температуры поверхности тела.

Для уменьшения погрешности за счет теплоотвода термоэлектрический термометр рекомендуется устанавливать на поверхности тела по всей длине соприкосновения термоэлектродов с поверхностью вдоль изотемы, вследствие чего теплоотвод от рабочего конца термоэлектрического термометра значительно уменьшается.

К дестабилизирующим факторам, воздействующим на ИИЗ, относятся также контактные термические сопротивления, которые влияют на формирование температурного поля в области измерения и определения ТФСМ [7]. Исследуемый материал отделен от среды, в которой проходят теплофизические измерения, некоторым пограничным слоем, представляющим собой определенное термическое сопротивление, ухудшающее условия теплообмена. Контактные термические сопротивления имеют место также при соприкосновении тел с одинаковыми или различными свойствами. Точность определения теплофизических характеристик во многом определяется отношением термического сопротивления исследуемого материала к контактному термическому сопротивлению. Чем выше это отношение, тем точнее при прочих равных условиях будут определены ТФСМ. При одних и тех же размерах тел и условиях контакта с окружающей средой это отношение всегда больше для материалов с низкой теплопроводностью, чем для материалов с большой теплопроводностью, например, для металлов.

Традиционный метод уменьшения контактного термического сопротивления заключается в тщательной обработке соприкасающихся поверхностей в области измерения (термозонда и исследуемого материала) и замене газовой прослойки между ними более проводящим веществом.

Влияние влажности окружающей среды является одним из важных дестабилизирующих факторов, воздействующих на термозонд при теплофизических измерениях. Поэтому необходимо определять теплофизические свойства одновременно с влажностью в процессе изготовления изделия и на основе полученных результатов прогнозировать свойства готовой продукции [25].

Проведены теплофизические эксперименты по оценке влияния влажности на различных материалах: рипоре, дереве, минвате, войлоке.

На рис. 3.1 отображены зависимости теплопроводности вышеперечисленных материалов от влажности.

Для установления влажности исследуемых материалов и изделий в первую очередь определяются ТФСМ, а затем используется зависимость теплопроводности материалов от их влажности [26].

Важное значение имеет определение ТФСМ при воздействии на термозонд изменения температуры окружающей среды [27]. Как показывают теплофизические эксперименты, проведенные при воздействии на термозонд низких и высоких температур, теплопроводность исследуемых материалов при увеличении температуры уменьшается, а при уменьшении температуры – увеличивается. На рис. 3.2 представлены зависимости теплопроводности исследуемых материалов от воздействия температур от  $-60$  до  $+60$  °С.

Независимость показаний термодатчиков в измерительной ячейке термозонда от воздействия температуры окружающей среды обеспечивается с помощью известного метода компенсации холодных спаев термопар [24], при котором холодные спаи термопар в процессе тепло-

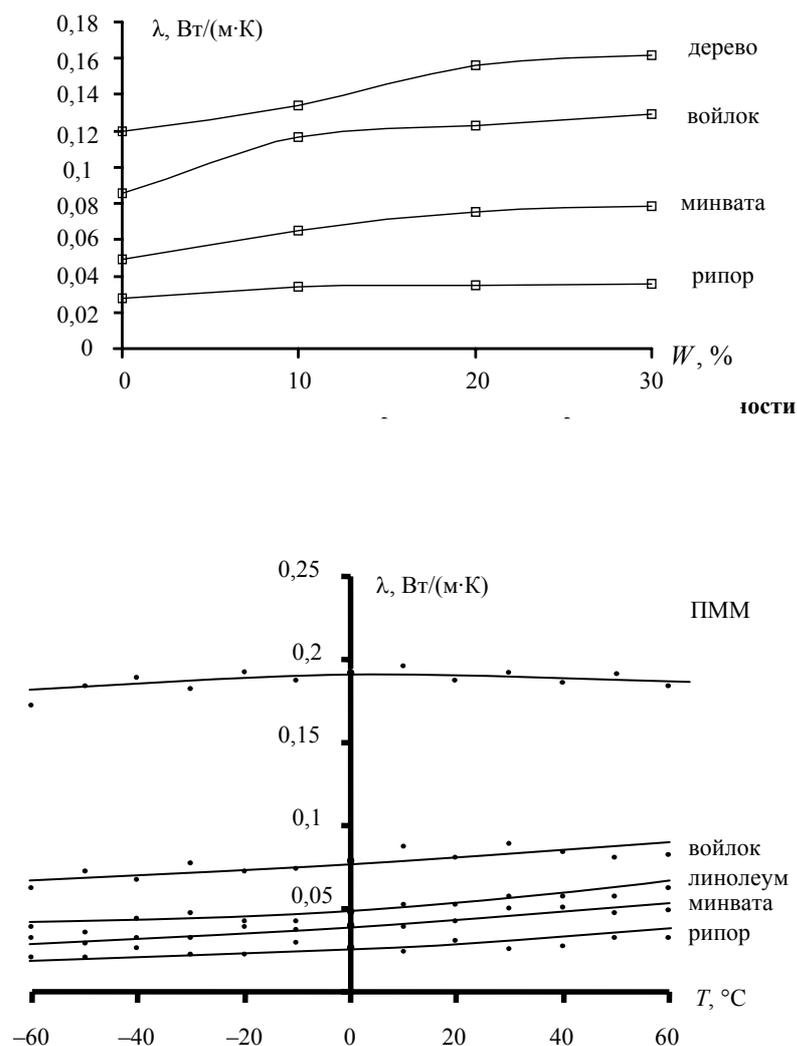


Рис. 3.2. Зависимости теплопроводности исследуемых материалов от воздействия температур

физического измерения должны находиться при одинаковой температуре. В термозонде в предлагаемой ИИИС холодные спаи термодатчиков размещены на одном разъеме термозонда.

Методом уменьшения составляющей общей погрешности результатов измерения при воздействии температуры окружающей среды является автоматическая коррекция результатов измерения на основе анализа экспериментальных термограмм, снятых при низких и высоких температурах окружающей среды. Автоматическая коррекция осуществляется аппаратными и программными средствами [28].

При аппаратной реализации автоматической коррекции в измерительную цепь микропроцессора включается дифференциальный усилитель, на один из входов которого поступает информационный сигнал с термозонда, а на второй – сигнал с термодатчика, регистрирующего температуру окру-

жающей среды. В результате на выходе дифференциального усилителя формируется разностный сигнал, пропорциональный избыточной температуре в области измерения. Программные средства микропроцессора позволяют выполнять автоматическую алгоритмическую коррекцию результатов измерения ТФСМ [27].

Дестабилизирующими факторами, воздействующими на АЦП, измерительные цепи ИИИС, являются помехи, которые классифицируются по их форме, источникам происхождения, по механизму проникновения в электрическую схему и многим другим признакам [29 – 35].

На рис. 3.3 показана структурная схема, отражающая ДФ, воздействующие на ИИИС.

### 3.1. Классификация воздействующих ДФ и помех на блоки и устройства ИИИС и способы устранения их воздействия на результаты измерения

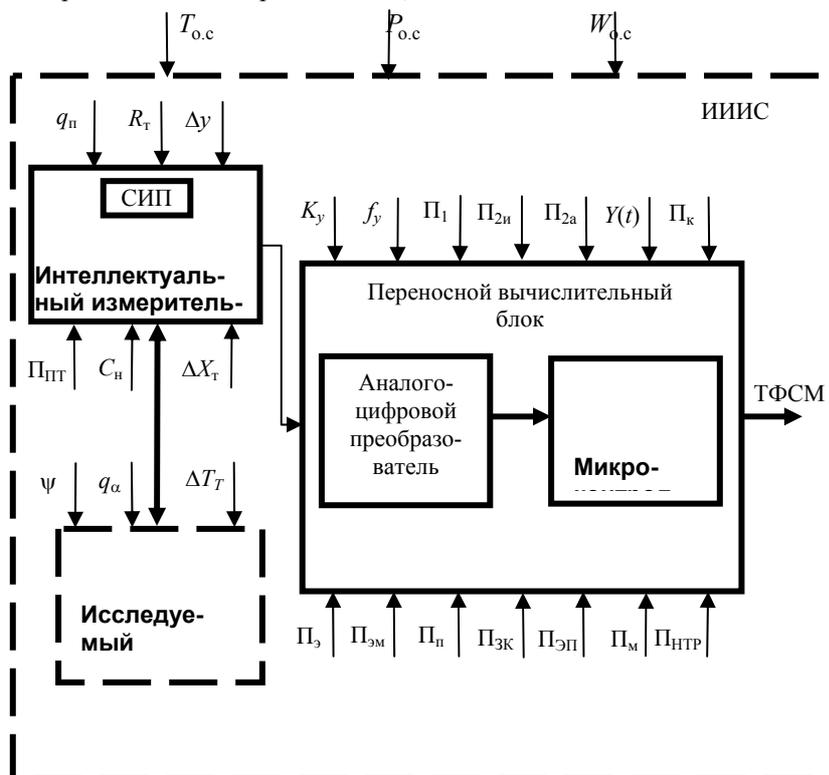
Воздействующие помехи и ДФ на блоки и устройства ИИИС	Блоки и устройства ИИИС	Способы устранения помех и ДФ на результаты измерения ТФСМ
1. Температура ОС	ИИИС	Автоматическая коррекция результатов измерения по аппроксимирующим зависимостям, включение в цепь ПИП ДУ
2. Давление ОС		Автоматическая коррекция результатов измерения по аппроксимирующим зависимостям
3. Влажность ОС		Автоматическая коррекция результатов измерения по аппроксимирующим зависимостям
4. Измерение теплоемкости нагревателя	ИИЗ	Использовать условие $(q_n / q_d) < \delta_n$
5. Измерение теплоотдачи в области измерения	ИИЗ	Учет тепловых потерь
6. Шероховатость ИМ	ИИЗ	Автоматическая коррекция результатов измерения по аппроксимирующим зависимостям
7. Теплоотвод по электродам термодатчика	ИИЗ	Термоэлектрический термометр рекомендуется устанавливать по всей длине соприкосновения термоэлектродов с поверхностью подложки ИИЗ
8. Контактные термические сопротивления	ИИЗ	Автоматическая коррекция результатов измерения по аппроксимирующим зависимостям. Тщательная обработка соприкасающихся поверхностей в области контакта ИИЗ и ИО, замена газовой прослойки между ними более проводящим веществом
9. Термические сопротивления	ИИЗ	Автоматическая коррекция результатов измерения по аппроксимирующим зависимостям
10 а) По форме: импульсные, флутакционные и регулярные б) По источникам происхождения: внутренние (флуктуации тока в резисторах, полупроводниковых приборах) и внешние (индустриальные и атмосферные) в) По источникам и механизму проникновения в измерительную цепь (кондуктивные, электрические	АЦП, ПИП	Электромагнитное экранирование, специальные конструкции, рациональный монтаж

	наводки, электромагнитные наводки, перекрестные, помехи постоянного тока, помехи из-за наличия заземленных контуров)		
11.	Помехи, связанные с электропитанием	ИИИС	Вводится сетевой фильтр с целью подавления кратковременных помех
12.	Погрешность, вносимая АЦП		АЦП Применить адаптивные измерительные процедуры и итеративные адаптивные алгоритмы
13.	Механические (удары, вибрации, ускорения)	ИИИС	Уменьшение габаритных размеров, подбор конструктивных материалов, увеличение собственных резонансных частот элементов конструкции, выбор способа крепления радиоэлектронных изделий
14.	Климатические (температура, влажность, давление)	ИИИС	Использование радиоэлектронных изделий, рассчитанных на работу в широком диапазоне температур, применение теплоотводящих и теплопроводящих конструктивных элементов
15.	Внешние и внутренние помехи (шумы от разводки питания, излучение электрического и магнитного полей)	ИИИС	Тщательная проработка трассировки печатных плат, выбор конструкции цепей питания, экранирование элементов и линий связи, введение информационной избыточности при передаче и хранении цифровой информации

В табл. 3.1 представлена классификация воздействующих дестабилизирующих факторов на блоки и устройства ИИИС и способы устранения их воздействия на результаты измерения ТФСМ.

Выполненный анализ воздействующих ДФ на исследуемый материал, ИИЗ, переносной вычислительный блок, включающий АЦП и МК, позволяет наметить пути при разработке модели ИИИС, отражающей воздействующие ДФ. На рис. 3.4 представлена структура ИИИС, на которой показаны ДФ, влияющие, как на ИИИС в целом, так и на отдельные ее блоки [36].

На рис. 3.4 использованы следующие обозначения ДФ:  $T_{o,c}$  – температура окружающей среды;  $P_{o,c}$  – давление окружающей среды;  $W_{o,c}$  – влажность окружающей среды;  $C_n$  – теплоемкость нагревателя термозонда;  $\psi$  – шероховатость поверхности ИМ; – изменение



**Рис. 3.4. Структура ИИИС, отражающая воздействующие дестабилизирующие факторы на блоки и устройства ИИИС**



расположения элементов термодатчика;  $Q_{\text{ИМ}}$  – количество тепла, рассеиваемое с поверхности ИМ за время теплофизического эксперимента;  $q_{\text{п}}$  – количество тепла, поглощаемое подложкой термозонда;  $\Delta T_T$  – изменение температуры ИМ при помещении на него термодатчиков термозонда;  $R_T$  – контактное термическое сопротивление в области измерения;  $\Delta y$  – погрешность преобразования ПИП;  $K_y$  – импульсные помехи, воздействующие на ИИИС;  $f_y$  – флуктуационные помехи, воздействующие на ИИИС;  $y(t)$  – регулярные помехи, воздействующие на ИИИС;  $\Pi_1$  – внутренние помехи, возникающие в ИИИС за счет флуктуаций тока в резисторах, полупроводниковых приборах и т.д.;  $\Pi_{2и}$  – внешние промышленные помехи, создаваемые разнообразными электрическими установками;  $\Pi_{2а}$  – внешние атмосферные помехи, обусловленные в основном разрядами молний;  $\Pi_k$  – кондуктивные помехи;  $\Pi_3$  – помехи, обусловленные электрическими наводками (емкостными);  $\Pi_{\text{п}}$  – перекрестные помехи;  $\Pi_{\text{ПТ}}$  – помехи постоянного тока, паразитные термо-ЭДС, возникающие в термоэлектрических цепях;  $\Pi_{3к}$  – помехи, вызванные наличием заземленных контуров;  $\Pi_{ЭП}$  – помехи, связанные с электропитанием;  $\Pi_m$  – помехи, обусловленные механическими воздействиями (удары, вибрация, ускорение);  $\Pi_{\text{НТР}}$  – помеха, возникающая в результате нарушения теплового режима конструкции ИИИС.

На основании анализа вышеизложенного по воздействию ДФ на ИИИС и приведенной структуры, отражающей воздействующие ДФ, можно сделать вывод, что при разработке метода определения ТФСМ и адаптивной ИИИС необходимо контролировать и вводить коррекцию, т.е. осуществлять автоматическую коррекцию результатов измерения при воздействии следующих основных ДФ:  $\psi$ ,  $R_T$ ,  $T_{\text{о.с}}$ ,  $W_{\text{о.с}}$ .

Как показывают экспериментальные и теоретические исследования, влиянием ДФ таких, как  $C_n$ ,  $\Delta X_T$ ,  $P_{\text{о.с}}$ , можно пренебречь, так как оно незначительно. Для устранения влияния на результат измерения других ДФ, воздействующих на АЦП и

МК, ИИЗ, приведены соответствующие рекомендации по изготовлению этих устройств и их эксплуатации в табл. 3.1.

Предлагаемые методы уменьшения составляющих общей погрешности основных блоков ИИИС позволяют повысить метрологический уровень определения ТФС материалов и изделий на 3...5 %.

Таким образом, анализ дестабилизирующих факторов, воздействующих на ИИЗ, переносной вычислительный блок, измерительные цепи ИИИС, и применение методов, позволяющих устранить их влияние на получение достоверной информации о температурном поле в области измерения, способствуют повышению точности определения ТФС материалов и готовых изделий.

### **3.2. ОПЕРАТИВНЫЙ МЕТОД НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ТВЕРДЫХ МАТЕРИАЛОВ**

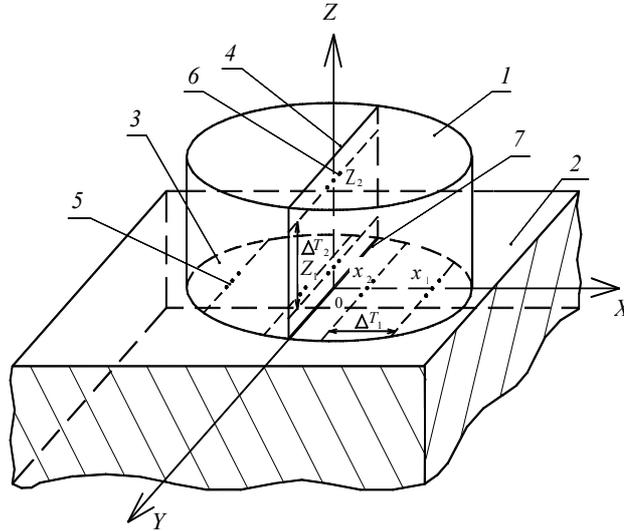
Предложен метод оперативного НК ТФСМ, сущность которого заключается в следующем [37, 38].

После проведения очередного теплофизического измерения с использованием метода НК ТФСМ, основанного на тепловом воздействии на поверхность исследуемого материала линейного нагревателя импульсами заданной частоты и мощности, помещают измерительный термозонд на вспомогательный образец из материала, близкого по теплофизическим свойствам к материалу подложки термозонда (рис. 3.5).

При этом температура  $T(x, z, \tau)$  в подложке термозонда при двумерном потоке тепла, вызванного действием мгновенного линейного источника тепла, определяется по соотношению [78]:

$$T(x, z, \tau) = \frac{Q}{4\pi\lambda\tau} \exp\left[-\frac{x^2 + z^2}{4a\tau}\right], \quad (3.1)$$

где  $Q$  – мощность теплового воздействия;  $(x, z)$  – координаты точки контроля температуры.



**Рис. 3.5. Физическая модель системы "Термозонд – вспомогательный образец"**

При частотно-импульсном воздействии на исследуемый материал температуру  $T(x, z, \tau)$  в точках контроля  $x, z$  при подаче  $n$ -го импульса рассчитывают по формуле

$$T(x, z, \tau) = \frac{QF}{4\pi\lambda} \sum_{i=1}^n \frac{1}{i} \exp\left[-\frac{x^2 + z^2}{4a\Delta\tau i}\right], \quad (3.2)$$

где  $F$  – частота тепловых импульсов;  $\Delta\tau$  – интервал времени между тепловыми импульсами.

На рис. 3.5 представлена физическая модель системы "Термозонд – вспомогательный образец", где введены следующие обозначения: 1 – подложка термозонда (тело 1); 2 – вспомогательный образец (тело 2); 3 – контактная плоскость  $XOY$  измерительной головки термозонда; 4 – плоскость  $ZOY$ , проходящая через линию нагревателя и перпендикулярная плоскости  $XOY$ ; 5 – основная термобатарея в плоскости  $XOY$ ; 6 – вспомогательная термобатарея в плоскости  $ZOY$  термозонда; 7 – нагреватель;  $x_2, x_1$  – точки контроля температуры в плоскости  $XOY$ , причем точка  $x_2$  расположена на заданном расстоянии от нагревателя, при котором отсутствует прямое влияние нагревателя за счет воздействия лучистого и конвективного теплообмена, а точка  $x_1$  – на расстоянии от края подложки, обеспечивающем отсутствие влияния краевого эффекта на результаты измерения из-за ограниченности размеров подложки зонда;  $z_2, z_1$  – точки контроля температуры в плоскости  $ZOY$ , при этом точка  $z_1$  расположена аналогично точке  $x_2$ , а  $z_2$  – на глубине, которая устраняет действие краевого эффекта из-за ограниченности подложки.

В ходе работы контролируют перепад температур в плоскости  $XOY$ ,  $z = 0$  в точках  $x_2, x_1$ , который определяется выражением

$$\begin{aligned} \Delta T_1(x_1, x_2, \tau) &= (x_2, \tau) - T(x_1, \tau) = \\ &= \frac{QF}{4\pi\lambda} \left[ \sum_{i=1}^n \frac{1}{i} \exp\left(-\frac{x_2^2}{4a\Delta\tau i}\right) - \sum_{i=1}^n \frac{1}{i} \exp\left(-\frac{x_1^2}{4a\Delta\tau i}\right) \right], \end{aligned} \quad (3.3)$$

и в плоскости  $YOZ$   $x = 0$  в точках  $z_2, z_1$ :

$$\begin{aligned} \Delta T_2(z_1, z_2, \tau) &= T(z_2, \tau) - T(z_1, \tau) = \\ &= \frac{QF}{4\pi\lambda} \left[ \sum_{i=1}^n \frac{1}{i} \exp\left(-\frac{z_2^2}{4a\Delta\tau i}\right) - \sum_{i=1}^n \frac{1}{i} \exp\left(-\frac{z_1^2}{4a\Delta\tau i}\right) \right]. \end{aligned} \quad (3.4)$$

При этом определяется момент времени, когда величина контролируемых перепадов температур  $\Delta T_1$  и  $\Delta T_2$  внутри подложки станет меньше наперед заданного значения  $\varepsilon$ , т.е.

$$\max\{\Delta T_1, \Delta T_2\} < \varepsilon. \quad (3.5)$$

На практике значение  $\varepsilon$  задается обычно не выше  $0,2 \dots 0,3$  °С, что позволяет считать наступление момента уравнивания (усреднения) температуры по всему объему подложки.

Как только перепады температур по объему подложки термозонда станут меньше заданной величины  $\varepsilon$ , что соответствует усреднению температуры по объему подложки термозонда, измерительный зонд приводят в контакт со следующим исследуемым материалом для проведения очередного измерения и определения искомого ТФС в соответствии с реализуемым в системе частотно-импульсным методом. При этом в системе "Термозонд – исследуемый материал" происходят два тепловых процесса.

Первый соответствует граничным условиям четвертого рода, т.е. теплообмену при контакте двух тел, температура одного из которых (подложки термозонда) выше другого. При этом на границе контакта этих тел температура устанавливается после контакта тел и остается постоянной на протяжении всего процесса теплообмена, так как относительная температура будет одинакова

$$\theta(0, \tau) = \theta(x, \infty) = \frac{K_3}{1 + K_3} = \text{const}, \quad (3.6)$$

где  $K_3$  – критерий, характеризующий тепловую активность первого тела по отношению ко второму,  $K_3 = \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \sqrt{\frac{a_2}{a_1}}$ , где  $\lambda_1, a_1$  – коэффициенты тепло- и температуропроводности подложки;  $\lambda_2, a_2$  – коэффициенты тепло- и температуропроводности исследуемого материала.

Второй тепловой процесс вызван действием импульсного источника тепла, помещенного в плоскости контакта двух тел. В соответствии с принципом суперпозиции температурное поле в каждой точке контактной поверхности будет определяться действием двух тепловых процессов:

$$T(x, \tau) = T_{\text{н}}(x, \tau) + T_{\text{н}}(x, \tau), \quad (3.7)$$

где  $T_{\text{н}}$  – температура, обусловленная действием остаточного тепла, аккумулированного в подложке термозонда от предыдущего измерения;  $T_{\text{н}}(x, \tau)$  – температура, обусловленная действием импульсного источника тепла.

Поскольку рабочие термодары на контактной поверхности подложки находятся в абсолютно одинаковых условиях по отношению к первому теплообменному процессу (см. соотношение (3.6)), то их дифференциальное



140	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13
150	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13

На рис. 3.6 и 3.7 приведены экспериментальные термограммы в точках контроля температур в плоскостях  $XOY$  и  $ZOY$  подложки термозонда после окончания теплофизического измерения на различных по теплопроводности материалах: рипоре, линолеуме, полиметилметакрилате (ПММ), винилискоже, газосиликате.

Анализ термограмм позволяет установить, что уравнивание температурного поля внутри подложки термозонда происходит в среднем за две минуты, т.е. осуществляется выполнение условия  $\Delta T < \varepsilon$  для исследуемых классов материалов. В ранее применявшемся в данной ИИИС способе измерения, интервал между теплофизическими измерениями составлял, как правило, около 10 минут.

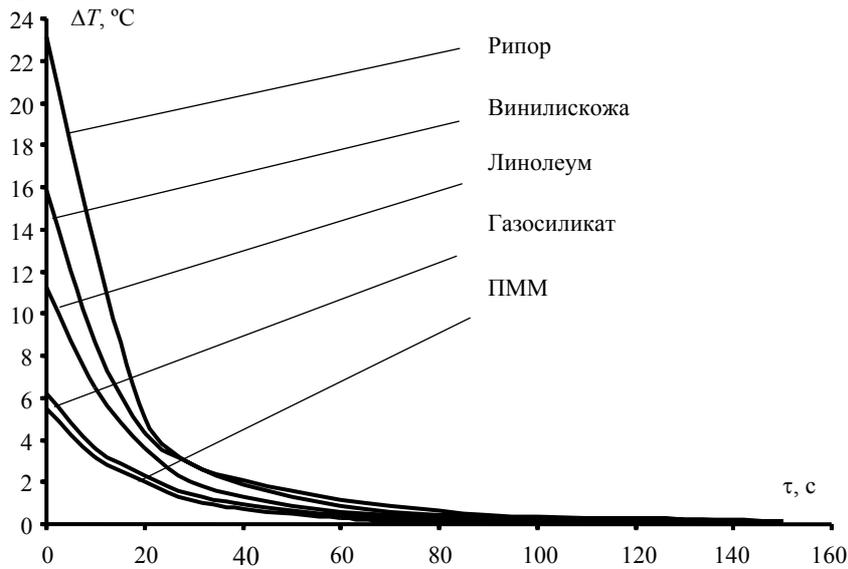


Рис. 3.6. Термограммы остывания подложки термозонда в плоскости  $XOY$  при  $\Delta x = 0,002$  м,  $\Delta x = x_2 - x_1$

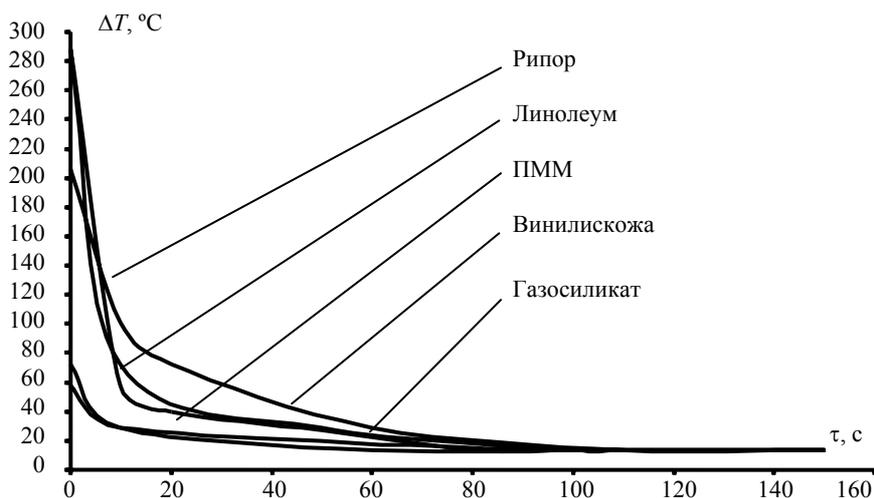


Рис. 3.7. Термограммы остывания подложки термозонда в плоскости  $ZOY$  при  $\Delta z = 0,002$  м, где  $\Delta z = z_2 - z_1$

Следовательно, предлагаемый метод определения ТФСМ способствует повышению оперативности проведения измерений в среднем в пять раз.

Сравнительный анализ расчетных и экспериментальных термограмм, приведенных для примера на рис. 3.8 и 3.9, позволяет сделать вывод, что максимальная относительная погрешность отклонения экспериментальных термограмм от расчетных составляет не более 4..5 %, что подтверждает корректность теоретического обоснования разработанного метода НК ТФСМ.

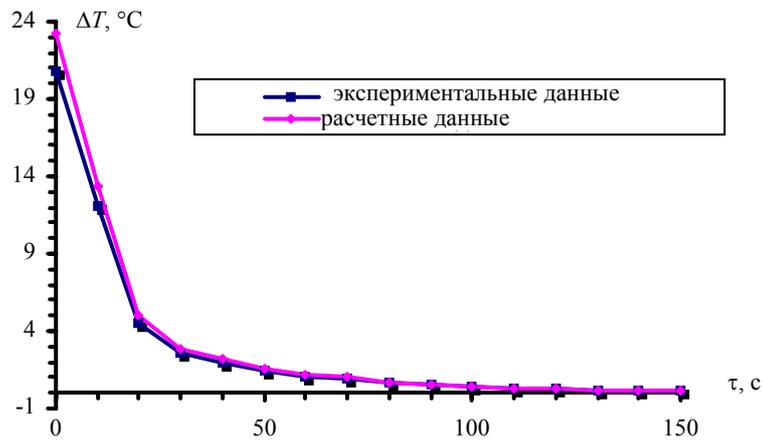


Рис. 3.8. Термограммы остывания подложки термозонда из рипора в плоскости  $XOY$

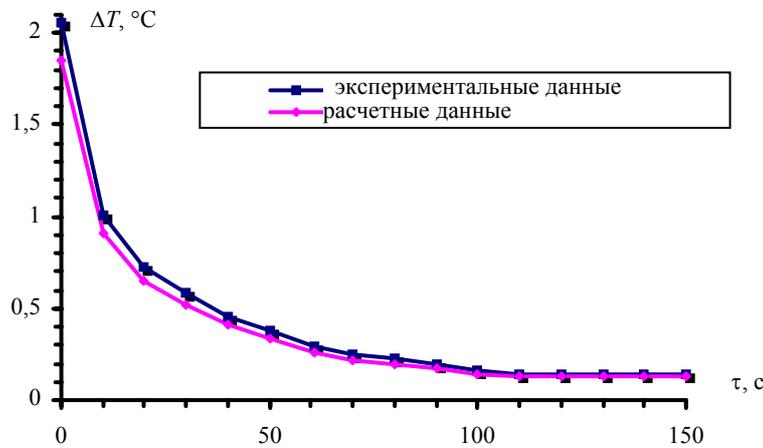


Рис. 3.9. Термограммы остывания подложки термозонда из рипора в плоскости  $ZOY$

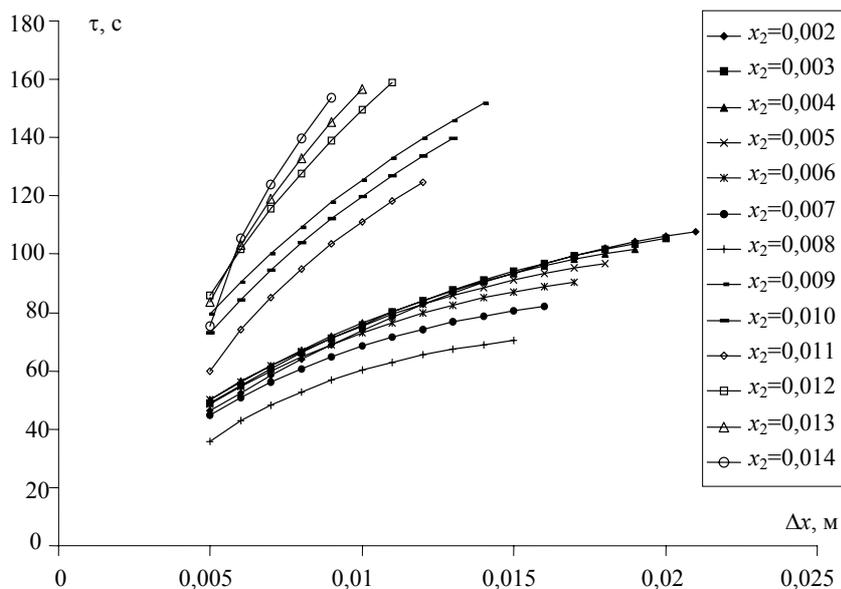
Как сказано выше, экспериментальным и расчетным путем установлено, что термостабилизация по объему подложки термозонда при помещении его на вспомогательный образец наступает при выполнении неравенства

$$\Delta T(x, \tau) < 0,3 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Из данного неравенства находим значение  $\tau_{\max}$ , при котором оно выполняется. При выполнении расчетов  $\tau_{\max}$  значения  $x_2, z_2$  задавались с минимальным расстоянием 1 мм от нагревателя,  $x_1, z_1$  – 1 мм от края подложки термозонда, а расстояние между  $x_1$  и  $x_2$  варьировалось с шагом 1 мм [39, 40].

На рис. 3.10 построены графики расчетных зависимостей  $\tau_{\max} = f(\Delta x)$ , ( $\Delta x = x_2 - x_1$ ) в плоскости  $XOY$  подложки термозонда, изготовленной из рипора.

Из приведенных графиков можно сделать вывод, что для исследуемых материалов максимальное время наступления уравнивания температурных перепадов в подложке термозонда при самом большом расстоянии  $\Delta x$  между термобатарейми составляет не более 2...3 мин [41, 42].



**Рис. 3.10.** График расчетной зависимости  $\tau_{\max}=f(\Delta x)$  в плоскости  $XOY$  подложки из рипора при  $x_2 = \text{const}$

Таким образом, предлагаемый оперативный метод НК ТФСМ позволяет не менее, чем в пять раз повысить производительность неразрушающего контроля ТФСМ, по сравнению с известными нестационарными методами, что подтверждается расчетными и экспериментальными данными.

### 3.3. ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ

Оперативный неразрушающий контроль теплофизических свойств материалов необходим на производстве как на стадии технологического процесса изготовления материалов, так и для контроля теплофизических свойств готовых изделий. Одним из путей повышения оперативности определения ТФС является применение методов искусственного интеллекта в информационно-измерительных системах НК ТФСМ [43].

В известных методах, используемых информационно-измерительными системами НК ТФСМ, тепловое воздействие наносится в виде импульсов с заданной длительностью и скважностью. Количество тепловых импульсов определяется моментом достижения установившегося теплового режима в объекте с наименьшей теплопроводностью из числа исследуемых материалов, теплопроводность которых соответствует определяемому диапазону теплопроводности ИИС [44 – 47]. В результате для исследуемых материалов с большей теплопроводностью время достижения установившегося теплового режима будет значительно меньше и не реализуются резервы повышения оперативности работы ИИС.

На рис. 3.11 представлены термограммы ИМ с различными значениями  $\lambda$ : рипора, пенопласта, минераловатной плиты, войлока, линолеума, бетона, полиметилметакрилата (ПММ), ТФСМ которых определяются с использованием ИИС при мощности теплового воздействия 2,5 Вт. Термограммы при различных значениях температуропроводности  $a$  аналогичны приведенным на рис. 3.11.

Анализ приведенных термограмм показывает, что время  $\tau_{\text{уст}}$  достижения установившегося теплового режима существенно зависит от теплопроводности исследуемых материалов и тем больше, чем меньше теплопроводность материала. Так, для рипора ( $\tau_{\text{уст.р}} \approx 140$  с) это время почти в два раза превышает  $\tau_{\text{уст}}$  для бетона ( $\tau_{\text{уст.б}} \approx 80$  с). Отсюда следует, что при работе с ИМ данного класса нецелесообразно в ИИС задавать одно фиксированное время  $\tau_{\text{уст.р}} \approx 140$  с (это соответствует подаче  $n_p$  тепловых им-

пульсов). Время  $\tau_{уст}$  должно выбираться с учетом  $a$  конкретного материала (рис. 3.12). Зависимость  $\tau_{уст}$  от теплопроводности приведена на рис. 3.13.

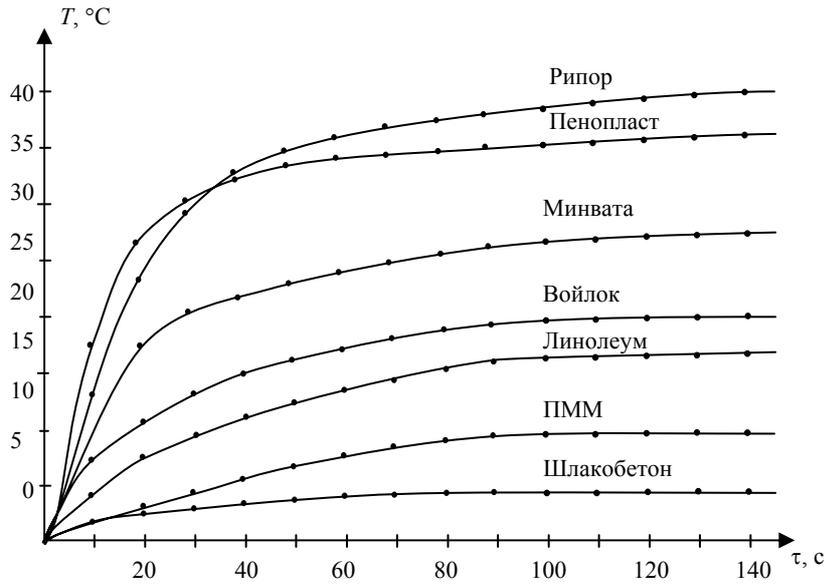


Рис. 3.11. Термограммы исследуемых материалов

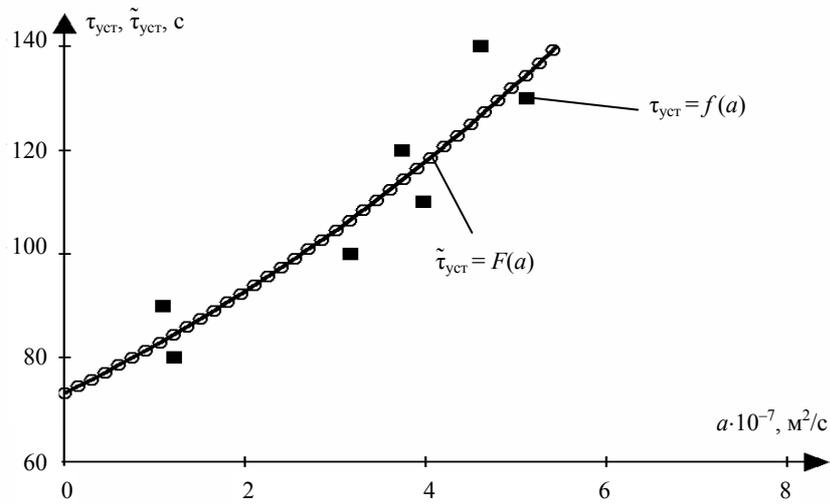


Рис. 3.12. Зависимость времени достижения установившегося теплового режима от теплопроводности ИМ и аппроксимирующая функция

$$\tilde{\tau}_{уст} = F(a) = 1,26 \cdot 10^8 + 68,69$$

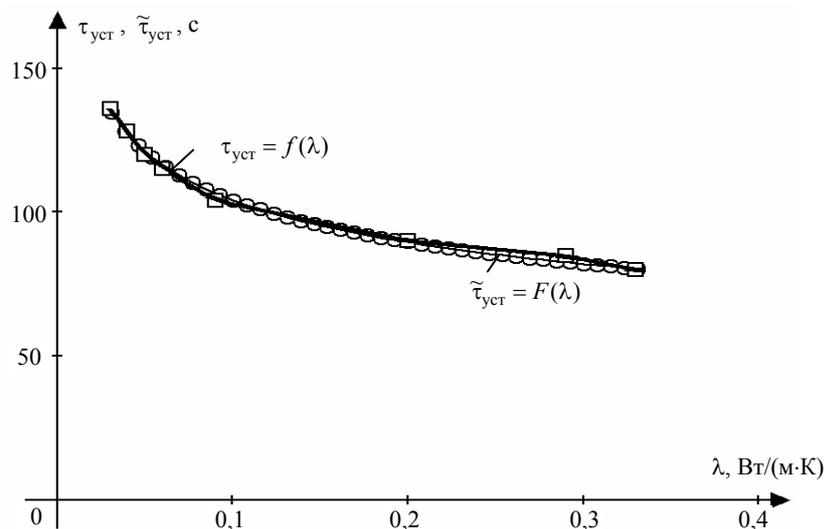


Рис. 3.13. Зависимость времени достижения установившегося теплового режима от теплопроводности ИМ  $\tau_{уст} = f(\lambda)$  и аппроксимирующая функция

$$\tilde{\tau}_{уст} = F(\lambda) = 63,17\lambda^{-0,217}$$

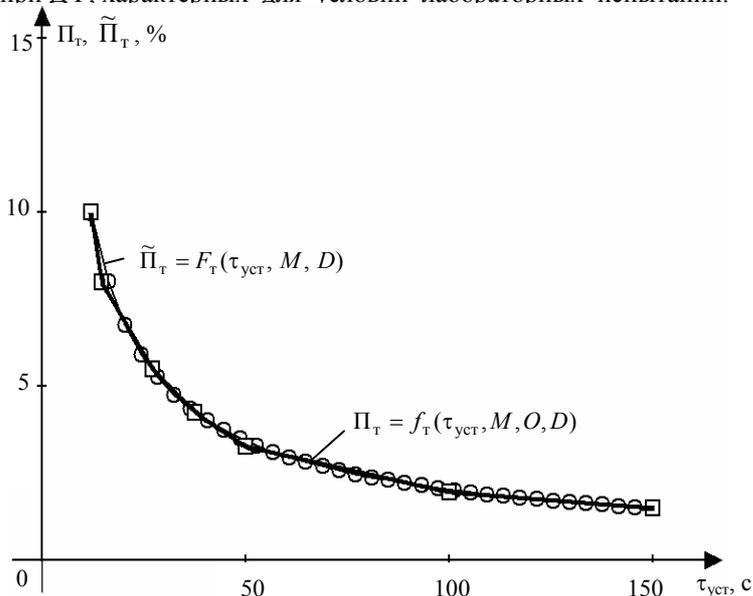
Данные обстоятельства учитываются в разработанной интеллектуальной ИИС для повышения оперативности контроля при обеспечении требуемой точности результатов.

Потери точности и оперативности ИИС НК ТФСМ в результате нерационального выбора времени достижения установившегося теплового режима могут быть оценены с помощью показателей точности ( $\Pi_T$ ) и оперативности ( $\Pi_{оп}$ ). В качестве  $\Pi_T$  будем использовать погрешность измерений, а показателем  $\Pi_{оп}$  будет служить время измерения ТФСМ. Функциональные зависимости этих потерь от  $\tau_{уст}$  должны учитывать применяемый метод НК ТФСМ и влияние дестабилизирующих факторов, т.е.

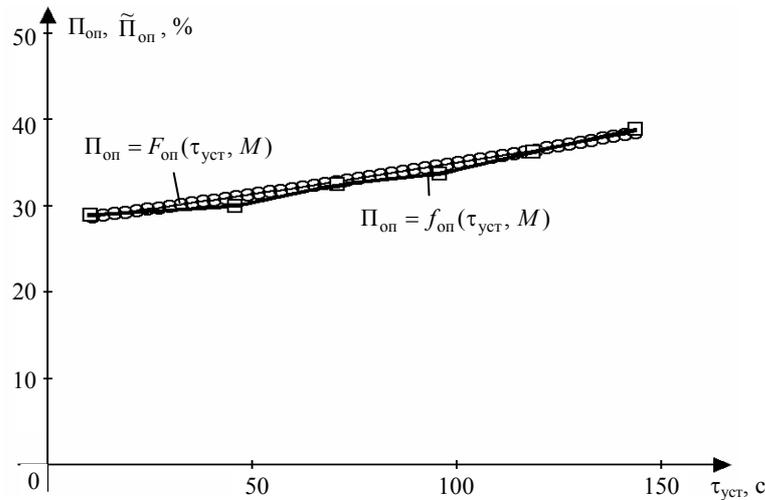
$$\Pi_T = f_T(\tau_{уст}, M, O, D), \quad \Pi_{оп} = f_{оп}(\tau_{уст}, M), \quad (3.8)$$

где  $M$  – множество используемых в ИИС методов НК ТФСМ,  $M \in \mathcal{M}$ ;  $O$  – множество ИМ,  $O \in \mathcal{O}$ ;  $D$  – множество детализирующих факторов,  $D \in \mathcal{D}$ , которые введены в БЗ.

Графическое представление вышеуказанных функций для метода М1, рассмотренного в [38], и исследуемого материала – шлакобетона (ИМ<sub>6</sub>) приведено соответственно на рис. 3.14 и 3.15 для усредненных значений  $\lambda$  и при ДФ, характерных для условий лабораторных испытаний.



**Рис. 3.14. Графики зависимостей  $\Pi_T = f_T(\tau_T, M, O, D)$  и аппроксимирующей функции  $\tilde{\Pi}_T = F_T(\tau_{уст}) = 65,27 \tau_{уст}^{-0,752}$**



**Рис. 3.15. Графики зависимостей  $\Pi_{оп} = f_{оп}(\tau_{уст}, M)$  и аппроксимирующей функции  $\tilde{\Pi}_{оп} = F_{оп}(\tau_{уст}, M) = 28,096 e^{0,0022 \tau_{уст}}$**

$$\tilde{\Pi}_{оп} = F_{оп}(\tau_{уст}, M) = 28,096 e^{0,0022 \tau_{уст}}$$

Аналогичные зависимости имеют место для других методов и материалов при определении их теплопроводности в лабораторных условиях.

Таким образом, для каждого метода и ИМ существует некоторое значение  $\tau_{уст}$ , при котором критерий, комплексно учитывающий потери точности и оперативности, минимален. Для определения оптимального значения  $\tau_{уст}^*$  введем критерий оптимальности, комплексно учитывающий потери точности и оперативности, т.е.

$$J(\tau_{уст}, M, O) = [C_1 \Pi_T(\tau_{уст}, M, O, D) + C_2 \Pi_{оп}(\tau_{уст}, M)] \rightarrow \min_{\tau_{уст}, M}, \quad (3.9)$$

где  $C_1, C_2$  – весовые коэффициенты.

Изменение критерия  $J = f(\tau_{уст}, O)$  при  $C_1 = C_2 = 1$  для зависимостей потерь, приведенных на рис. 3.14, 3.15, показано на рис. 3.16; оптимальное время достижения установившегося теплового режима  $\tau_{уст}^*$  в данном случае равно 80 с.

В базе знаний интеллектуальной ИИС содержатся:

- зависимости функций потерь вида (3.8) для различных методов и материалов;
- формулы расчета оптимального времени  $\tau_{уст}^*$  в зависимости от выбранных весовых коэффициентов (см. (3.9));
- зависимость  $\tau_{уст}$  от  $\lambda$  при использовании различных методов;
- зависимость  $\tau_{уст}$  от  $a$  для применяемых методов;
- рекомендуемые значения показателя установившегося теплового режима  $\beta$  для различных материалов (теплопроводностей).

Предлагаемый интеллектуальный метод позволяет определить с использованием сведений, содержащихся в базе данных, оптимальное количество тепловых импульсов  $n^*$ , подаваемых на ИМ до достижения установившегося теплового режима в области контакта исследуемого материала и интеллектуального измерительного зонда [48].

Оптимальное число тепловых импульсов  $n^*$  в зависимости от измерительной ситуации определяется одним из следующих способов.

При первом способе (С1) значение теплопроводности ИМ известно с достаточной мерой доверия определяемой по методу Демстера-Шафера, и

$n^*$  вычисляется по зависимости, приведенной на рис. 3.12, по величине

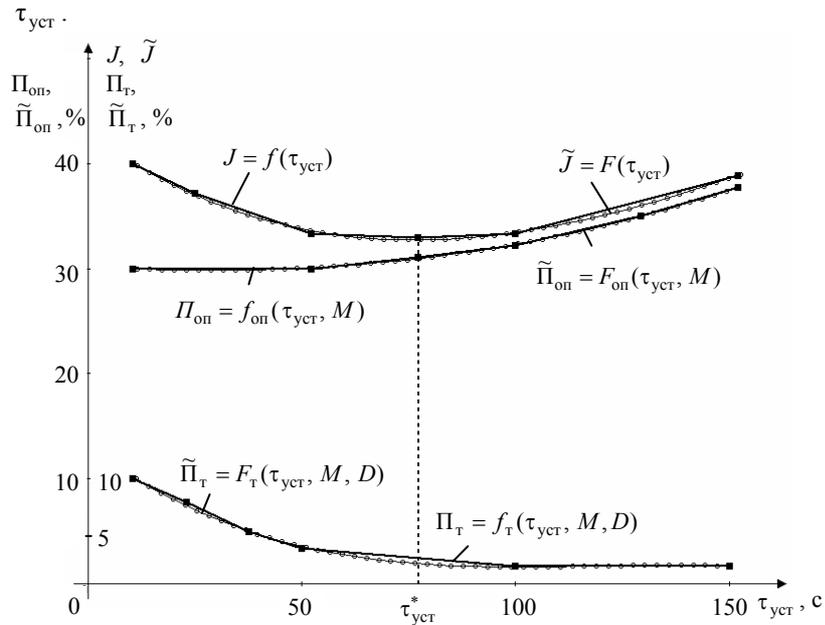


Рис. 3.16. Графики зависимостей  $J = f(\tau_{уст}, O_6)$  и аппроксимирующие зависимости

$$\begin{aligned} \tilde{\Pi}_t = F_t(\tau_{уст}, M, D) &= -(7,38 \cdot 10^{-6})\tau_{уст}^3 + 0,0026\tau_{уст}^2 - 0,303\tau_{уст} + 13,08; \\ \tilde{\Pi}_{оп} = F_{оп}(\tau_{уст}, M) &= (5,719 \cdot 10^{-7})\tau_{уст}^3 + (4,062 \cdot 10^{-4})\tau_{уст}^2 - 0,025\tau_{уст} + 30,208; \\ \tilde{J} = F(\tau_{уст}) &= -(4,288 \cdot 10^{-6})\tau_{уст}^3 + 0,0023\tau_{уст}^2 - 0,289\tau_{уст} + 42,83 \end{aligned}$$

Для этого используется следующая формула. Так как

$$\tau_{уст}^* = \tau_{и} n^* + \Delta\tau(n^* - 1),$$

то

$$n^* = \frac{\tau_{уст}^* + \Delta\tau}{\tau_{и} + \Delta\tau}, \quad (3.10)$$

здесь  $\tau_{и}$  – длительность импульсов.

Измерительная процедура первого способа заключается в следующем. По предварительной тестовой термограмме на первом этапе измерения ТФСМ оценивают  $a$  ИМ и по графику  $\tau_{уст} = f(a)$  фиксируют  $\tau_{уст}^*$ . Затем по формуле (3.10) определяют число тепловых импульсов, которое надо подать на ИМ до наступления установившегося теплового режима.

Термограммы, приведенные на рис. 3.11, получены при длительности импульсов  $\tau_{и} = 0,6$  с и  $\Delta\tau = 5$  с. В этом случае, например, для рипора согласно формуле (3.10)

$$n^* = \frac{\tau_{уст}^* + 5}{5,6} = \frac{140 + 5}{5,6} = 26,$$

для линолеума

$$n^* = \frac{\tau_{уст}^* + 5}{5,6} = \frac{100 + 5}{5,6} = 19.$$

Таким образом, число подаваемых тепловых импульсов при измерении ТФС линолеума, по сравнению с числом импульсов для рипора, сократилось с 26 до 19 (соответственно время – со 140 до 100 с), т.е. оперативность определения ТФС увеличилась на 30 % при сохранении точности.

Во втором способе (С2) для материалов с неизвестными значениями  $\lambda$  установившийся тепловой режим определяют в результате сравнения температур (после подачи  $(i-1)$ -го и  $i$ -го импульсов) снимаемой термограммы в процессе измерения ТФСМ по разности среднеинтегральных температур, измеряемых двумя термобатарейми (ТБ $_{\mu}$ ,  $\mu = 1,2$ ). Эта разность оценивается по формуле

$$\Delta \bar{T}_{\text{cp}}(i) = \bar{T}_i - \bar{T}_{i-1} = \frac{1}{2m} \sum_{j=1}^m \sum_{\mu=1}^2 T_{ij}(\text{ТБ}\mu) - \frac{1}{2m} \sum_{j=1}^m \sum_{\mu=1}^2 T_{i-1,j}(\text{ТБ}\mu), \quad (3.11)$$

где  $T_{ij}(\text{ТБ}\mu) = \frac{QF}{2\pi\lambda} \sum_{v=1}^i \frac{1}{v} \exp\left(-\frac{x_{j\text{ТБ}\mu}^2}{4a\Delta\tau v}\right)$ ;  $x_{j\text{ТБ}\mu}$  – расстояние от нагревателя

до  $j$ -го термодатчика  $\mu$ -й термобатарей.

Тепловой режим считается установившимся, когда разность  $\Delta \bar{T}_{\text{cp}}(i = n)$  будет меньше некоторого задаваемого числа  $\beta$ . От величины  $\beta$  зависит погрешность измерения ТФСМ. Значение  $\beta$  устанавливается экспериментальным путем. Для приведенных на рис. 3.11 термограмм определена зависимость  $\beta = f(\lambda)$ , полученная из условия обеспечения погрешности при измерении  $\lambda$  не более 5% (см. рис. 3.17). Из данного графика следует, что чем больше теплопроводность, тем меньше должно быть  $\beta$ .

В ходе реальных измерений для определения  $\beta$  при возможных воздействиях дестабилизирующих факторов решается задача идентификации измерительной ситуации с использованием аппарата нечеткой

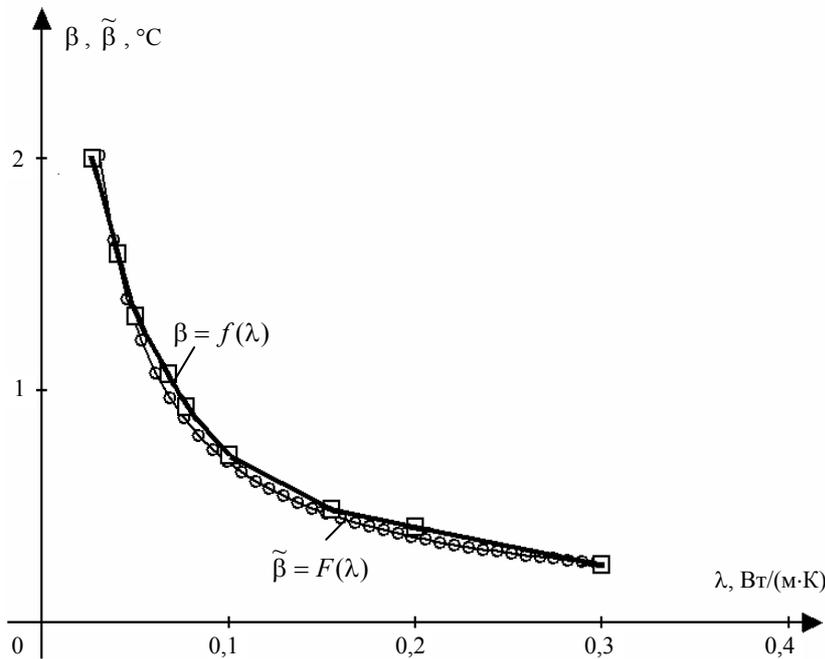


Рис. 3.17. График зависимости  $\beta = f(\lambda)$ ,  $\tilde{\beta} = F(\lambda) = 0,086\lambda^{-0,903}$

логики. Применение искусственного интеллекта в предлагаемом методе позволяет выбрать  $\beta^*$  из интервала  $[0,1; 2]$  °C и обеспечить определение  $\lambda$  с прогнозируемой погрешностью до 5%. Выполнение неравенства  $\Delta \bar{T}_{\text{cp}}(n) \leq \beta$  свидетельствует об установившемся тепловом режиме в плоскости контакта ИМ и ИИЗ и прекращении подачи тепловых импульсов.

Измерительная процедура во втором способе заключается в подаче тепловых импульсов заданной частоты и мощности на ИМ, сравнении в процессе измерения значений  $\bar{T}_{i-1}$ ,  $\bar{T}_i$  и контроле выполнения неравенства  $\Delta \bar{T}_{\text{cp}}(i) \leq \beta$ .

Перед проведением очередного измерения термозонд помещается на вспомогательный образец из материала, близкого по теплофизическим свойствам к материалу подложки термозонда. Тепловое равновесие в системе «Термозонд – вспомогательный образец», характеризующееся температурой усреднения, наступает за разные промежутки времени  $\tau_{\text{уср}}$  в зависимости от теплопроводности материала подложки термозонда. В предлагаемом методе на основе полученных экспериментальных и аппроксимирующих зависимостей времени достижения теплового равновесия  $\tau_{\text{уср}}$  от  $\lambda$

для теплоизоляционных и строительных материалов, которые приведены на рис. 3.18, применяется интеллектуальная процедура, позволяющая выбрать оптимальное  $\tau_{\text{уср}}^*$  из заданного диапазона 50...150 с для материала подложки, указанного в априорной информации, занесенной в БЗ.

Результаты экспериментальных исследований по определению теплофизических свойств ряда материалов с помощью предлагаемого интеллектуального метода НК ТФСМ приведены в табл. 3.3. Из анализа погрешностей измерений следует, что относительная погрешность измерений составляет не более 5 % и находится в допустимых для исследуемых материалов пределах.

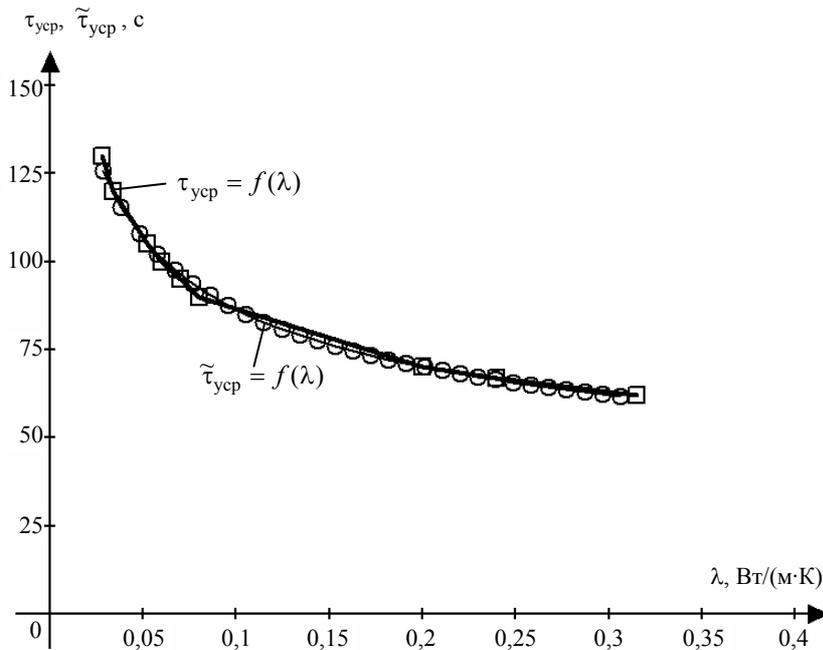


Рис. 3.18. График зависимости  $\tau_{\text{уср}} = f(\lambda)$  и аппроксимирующая функция

$$\tilde{\tau}_{\text{уср}} = f(\lambda) = 43,24\lambda^{-0,301}$$

### 3.3. Теплофизические свойства, параметры теплофизических измерений ( $\tau_{\text{уст}}^*$ , $\tau_{\text{уср}}^*$ , $\beta^*$ , $n^*$ ) и погрешности измерения теплоизоляционных и строительных материалов

Исследуемые материалы	Эталонные значения		Измеренные значения		$\tau_{\text{уст}}^*$ , с	$\tau_{\text{уср}}^*$ , с	$n^*$	$\beta^*$ , °C	Относительная погрешность измерения	
	$a \cdot 10^{-7}$ , м <sup>2</sup> /с	$\lambda$ , Вт/(м·К)	$a \cdot 10^{-7}$ , м <sup>2</sup> /с	$\lambda$ , Вт/(м·К)					$\delta_a$ , %	$\delta_\lambda$ , %
2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1. Рипор	4,61	0,028	4,78	0,029	140	130	26	2,00	3,69	3,57
2. Пенопласт	5,12	0,034	5,33	0,035	130	120	24	1,81	4,10	2,94
3. Минвата	3,74	0,052	3,92	0,054	120	105	22	1,33	4,81	3,85

4. Войлок	3,98	0,07	4,15	0,073	110	95	20	1,08	4,27	4,28
5. Линолеум	5,17	0,08	5,43	0,084	100	90	19	0,94	5,00	5,00
6. ПММ	1,09	0,195	1,14	0,202	90	70	17	0,42	4,59	3,59
7. Шлако-бетон	1,22	0,32	1,27	0,33	80	65	15	0,28	4,10	3,12

Таким образом, применение интеллектуального метода для НК ТФСМ позволяет в (1,5–2) раза повысить оперативность определения ТФСМ с прогнозируемой точностью измерений до 5 %. Этот результат достигнут применением процедуры искусственного интеллекта для выбора способа определения ТФСМ в зависимости от измерительной ситуации, решения задачи минимизации функционала, комплексно учитывающего потери точности и оперативности, определения оптимального количества тепловых импульсов, подаваемых на ИМ, выбор оптимальных параметров теплофизических измерений ( $\tau_{уст}^*$ ,  $\tau_{уср}^*$ ,  $\beta^*$ ,  $n^*$ ) с использованием полученных расчетно-экспериментальных зависимостей  $\tau_{уст} = f(\lambda)$ ,  $\beta = f(\lambda)$ ,  $\tau_{уср} = f(\lambda)$ .

#### 3.4. АЛГОРИТМ, СТРУКТУРА ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ЦЕПИ, РЕАЛИЗУЮЩИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТФСМ

В вышеизложенных методах (разделы 3.2; 3.3) определение искомым теплофизических свойств исследуемого материала (тепло- и температуропроводности) осуществляется в соответствии с реализуемым в системе частотно-импульсным методом. При этом необходимо иметь полную измерительную информацию о тепловых процессах в исследуемых материалах, которую содержит температурное поле в контактной плоскости тепловой системы "термозонд – исследуемый материал" и в перпендикулярной ей плоскости в подложке термозонда, проходящей через линию нагревателя.

Большинство методов определения ТФСМ основано на решениях при заданных краевых условиях линейного дифференциального уравнения теплопроводности [49]:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a \nabla^2 T,$$

где  $\nabla^2$  – оператор Лапласа.

Из анализа существующих методов НК ТФСМ можно сделать вывод, что нестационарные методы с использованием линейного импульсного источника тепла наиболее перспективны, так как характеризуются простотой реализации, допустимой для исследуемого класса материалов точностью и оперативностью.

Рассмотрим метод [50, 51] при действии линейного мгновенного источника тепла в плоскости контакта двух полуограниченных тел, на основе которого определяются ТФСМ в предложенном оперативном методе  $M_{оп}$  (см. раздел 3.2 данной работы). При этом процесс распространения тепла на теплоизолированной поверхности полубесконечного в тепловом отношении тела при действии линейного источника тепла описывается решением задачи теплопроводности [52], которое имеет вид

$$T(x, \tau) = \frac{Q}{4\pi\lambda\tau} \exp\left(-\frac{x^2}{4a\tau}\right), \quad (3.12)$$

где  $x$  – расстояние от линейного источника тепла до точки контроля.

При частотно-импульсном воздействии на исследуемый материал температура  $T(x, n)$  в моменты контроля  $n$  и  $m$  при подаче  $n$ -го импульса на основе (3.12) может быть определена по формуле

$$T(x, n) = \frac{QF}{4\pi\lambda} \sum_{i=1}^{n-1} \frac{1}{i} \exp\left(-\frac{x^2 F}{4ai \Delta\tau}\right). \quad (3.13)$$

Измерив значения температуры  $T(x, n)$  и  $T(x, m)$  и беря отношение соответствующих правых частей (3.13), получим

$$\frac{T(x, n)}{T(x, m)} = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} \frac{1}{i} \exp\left(-\frac{x^2 F}{4ai \Delta\tau}\right)}{\sum_{i=1}^{m-1} \frac{1}{i} \exp\left(-\frac{x^2 F}{4ai \Delta\tau}\right)}, \quad (3.14)$$

т.е. в неявном виде для соотношения имеет место равенство

$$f(a, T(x, n)/T(x, m)) = 0. \quad (3.15)$$

Из соотношения (3.14) видно, что существует некоторая зависимость

$$a = f\left(\frac{T(x, n)}{T(x, m)}\right). \quad (3.16)$$

Исследовались различные аппроксимации этой зависимости. Наиболее удобными в вычислительном отношении являются следующие

$$a = K_1 \exp\left(K_2 \frac{T(x, n)}{T(x, m)}\right), \quad (3.17)$$

$$\left(a \cdot 10^{-7}\right) = 1 + K_{11} \left(\frac{T(x, n)}{T(x, m)} \exp\left(K_{21} \frac{T(x, n)}{T(x, m)}\right)\right), \quad (3.18)$$

где  $K_1, K_{11}, K_2, K_{21}$  – константы, зависящие от  $x, F, n, m, a_3$  и  $\lambda_3$ .

Расчет  $\lambda$  при известных значениях констант производится по формуле

$$\lambda_2 = \frac{1}{T(x, m)} K_{12} \ln(K_{32} a + K_{31}), \quad (3.19)$$

где  $K_{12}, K_{32}, K_{31}$  – константы.

Зависимость вида (3.16), (3.18) можно получить для различных ситуаций, в том числе и тогда, когда тело (эталон) не является идеальным изолятором.

Учитывая требования к точности и быстродействию вычислительных средств, в качестве формул для расчета  $a$  и  $\lambda$  взяты следующие:

$$a = K_1 \exp\left(K_2 \frac{T_n}{T_m}\right); \quad \lambda = \frac{1}{T_m} K_3 \ln(K_4 a); \quad (3.20)$$

$$T_n = T(x, n); \quad T_m = T(x, m),$$

где  $K_1, K_2, K_3, K_4$  – константы, определяемые при градуировке при-бора.

Произведя замеры температур  $T_n$  и  $T_m$  для двух материалов с известными  $a, \lambda$ , на основе (3.20) получаем

$$\left( \begin{array}{l} a_1 = K_1 \exp\left(K_2 \frac{T_{n1}}{T_{m1}}\right) \\ a_2 = K_1 \exp\left(K_2 \frac{T_{n2}}{T_{m2}}\right) \end{array} \right); \quad \left( \begin{array}{l} \lambda_1 = \frac{1}{T_{m1}} (K_3 \ln(K_4 a_1)) \\ \lambda_2 = \frac{1}{T_{m2}} (K_3 \ln(K_4 a_2)) \end{array} \right), \quad (3.21)$$

где  $T_{ni}, T_{mi}, a_i, \lambda_i$  – значения температур и коэффициентов для  $i$ -го материала,  $i = 1, 2$ .

Решая попарно четыре уравнения (3.21), находим параметры

$$K_2 = \frac{\ln \frac{a_2}{a_1}}{\frac{T_{n2}}{T_{m2}} - \frac{T_{n1}}{T_{m1}}}; \quad K_1 = \frac{a_1}{\exp\left(K_2 \frac{T_{n1}}{T_{m1}}\right)}; \quad (3.22)$$

$$K_4 = \exp\left[\frac{\ln a_1 - \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \frac{T_{m1}}{T_{m2}} \ln a_2}{\frac{\lambda_1}{\lambda_2} \frac{T_{m1}}{T_{m2}} - 1}\right]; \quad K_3 = \frac{\lambda_1 T_{m1}}{\ln(K_4 a_1)}. \quad (3.23)$$

Параметры  $K_1$ ,  $K_2$ ,  $K_3$  и  $K_4$  заносятся в память микропроцессора и используются при дальнейших измерениях.

Для контроля температуры в контактной плоскости термозонда расположены термобатарей с размещением термодатчиков по всей контролируемой поверхности подложки, что позволяет рассчитать среднеинтегральное значение температурного поля.

Для вышеизложенных алгоритма измерения и предлагаемого метода составлена структурная схема измерительной цепи, которая представлена на рис. 3.19. Данная схема позволяет осуществить теплофизическое измерение в соответствии с реализуемым в ИИИС частотно-импульсным методом и определить искомые ТФСМ [22, 53, 54].

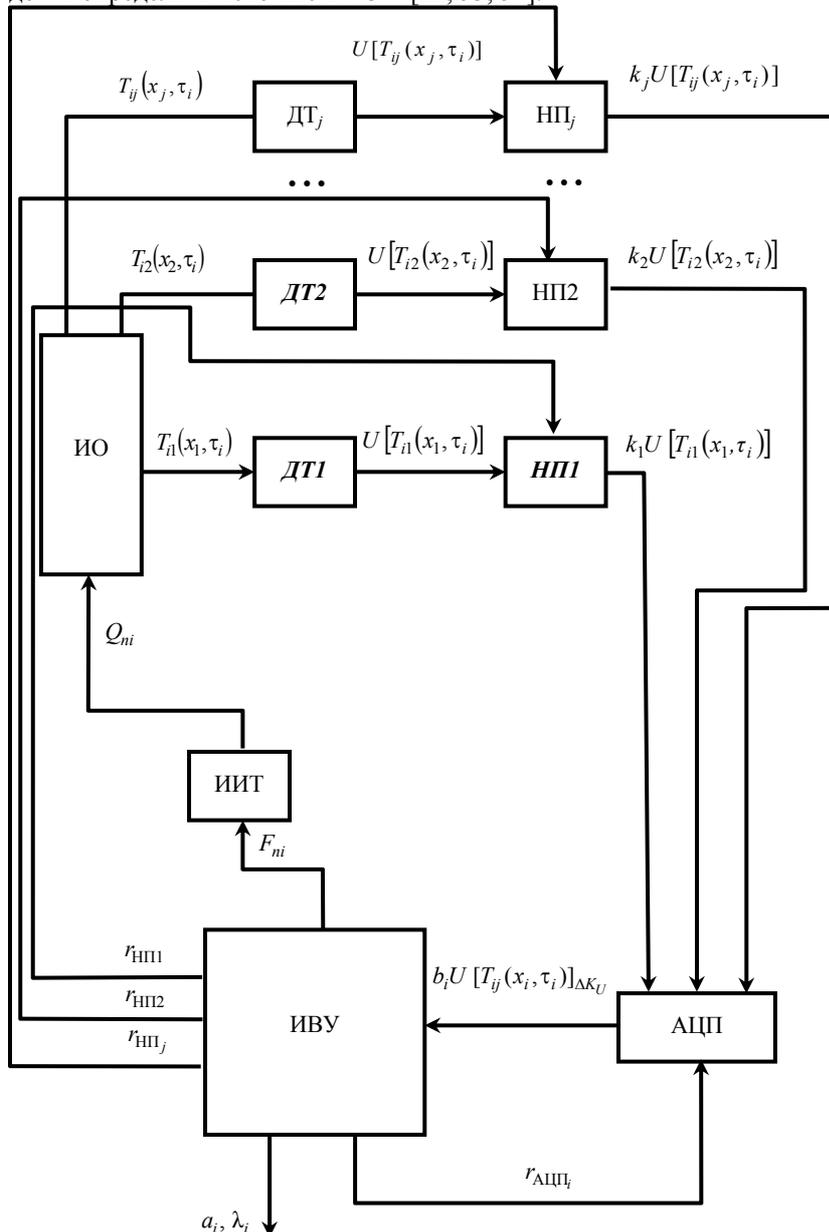


Рис. 3.19. Структурная схема измерительной цепи, реализующей разработанный интеллектуальный метод НК ТФСМ

На рис. 3.19 составляющие блоки измерительной цепи обозначены следующим образом: ИМ – исследуемый материал, ИИТ – импульсный источник тепла, осуществляющий тепловое воздействие на материал исследования; ДТ1, ДТ2, ..., ДТ<sub>j</sub> – датчики контроля температуры в плоскости контакта ИМ и ИИЗ (первичные измерительные преобразователи (ПИП)); НП1, НП2, ..., НП<sub>j</sub> – нормирующие преобразователи сигналов соответственно с ДТ1, ДТ2, ..., ДТ<sub>j</sub>, выполняющие также функции усиления;  $k_1, k_2, \dots, k_3$  – характеристики преобразования (усиления) НП1, НП2, ..., НП<sub>j</sub>; АЦП – адаптивный аналого-цифровой преобразователь; ИВУ – интеллектуальное вычислительное устройство, которое осуществляет функции определения ТФСМ и изделий, а также управление теплофизическими измерениями с адаптацией по температуре, влажности, шероховатости, контактному термосопротивлению исследуемого материала и мощности теплового воздействия;  $n_i$  – количество воздействующих тепловых импульсов;  $F_{ni}$  – управляющие частотные сигналы,  $r_{НПj}$  – идентификаторы управляющих команд, поступающих с ИВУ на нормирующие преобразователи;  $r_{ком.i}$ ,  $r_{АЦПi}$  – идентификаторы команд, поступающих с ИВУ соответственно на АЦП.

Формализованное описание измерительных процедур осуществляется с помощью уравнений измерений, изложенных в работах [32, 55].

Уравнения измерений для определения ТФСМ исследуемых материалов и изделий в соответствии с формулами (3.20) имеют следующий вид:

$$a_i^* = \langle K_1 \langle \exp \langle K_2 \frac{\langle T_n^* \rangle_{q_{1i}}}{\langle T_m^* \rangle_{q_{2i}}} \rangle q_{3i} \rangle q_{4i} \rangle q_{5i} ; \quad (3.24)$$

$$\lambda_i^* = \langle \frac{1}{\langle T_m^* \rangle_{q_{1i}}} \langle K_3 \langle \ln \langle (K_4 \langle a \rangle q_{2i}) \rangle q_{3i} \rangle q_{4i} \rangle q_{5i} \rangle q_{6i} , \quad (3.25)$$

где  $q$  – характеристики округления, зависящие от разрядности микроконтроллера.

Уравнения (3.24) и (3.25) описывают процедуры косвенных измерений, в которых используются следующие результаты прямых измерений температуры  $T(x, \tau)$ :

$$T_i^*(x, \tau) = \langle T^H \left( \langle \langle [bU(T_i(x, \tau))]_{\Delta_k T}^h \rangle q_{1i} \langle \langle m_T \rangle q_{2i} \rangle q_{3i} \rangle \right) q_{4i} ,$$

где  $U(T)$  – статическая характеристика первичного измерительного преобразователя;  $\langle \cdot \rangle$  – числовой результат измерительного преобразования в цифровой форме;  $T^H(U)$  – градуировочная характеристика (ПИП);  $m_T$  – коэффициент масштабирования,  $m_T = \frac{\Delta_k T}{T' b_i}$ ;  $\Delta_k T$  – интервал квантования;

$T'$  – принятая единица измерения;  $b$  – коэффициент нормализации с номинальным значением  $b_i$ ;  $h$  – переходная характеристика ПИП.

Рассмотренный частотно-импульсный метод и реализующая его измерительная цепь позволяют осуществить предложенный метод, повышающий производительность неразрушающего контроля теплофизических свойств твердых материалов и изделий из них.

### 3.5. ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЙ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ ЗОНД ДЛЯ НК ТФСМ

Известные методы и информационно-измерительные системы для неразрушающего контроля теплофизических свойств материалов используют информацию о температурном поле в исследуемых материалах, поступающую с измерительного зонда (ИЗ), который является одним из основных устройств ИИС НК ТФСМ [56, 57]. Вследствие этого конструкция ИЗ должна соответствовать установленным техническим требованиям, выполнение которых позволяет получить достоверную информацию об ИМ [58].

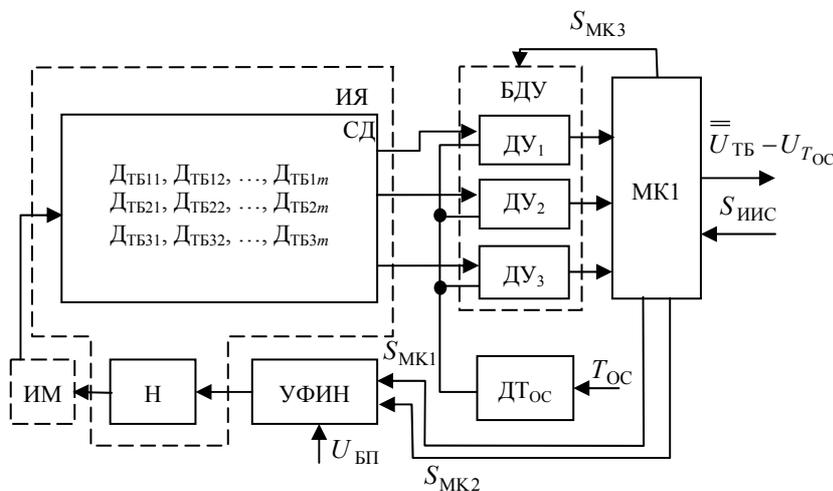
Сложность получения достоверной информации о ТФСМ связана с тем, что на результаты измерения оказывают влияние как воздействие

внешних факторов, так и несовершенство конструкций применяемых ИЗ. К основным недостаткам известных конструкций ИЗ можно отнести следующие: получение информации о температурном поле в области контакта ИЗ и ИМ только по нескольким точкам контроля, существенное влияние воздействия температуры окружающей среды на результаты измерения, отсутствие адаптации по мощности теплового воздействия на ИМ с различной теплопроводностью, влияние на измерительную информацию тепла от предыдущего измерения.

Разработан ИИЗ, позволяющий повысить оперативность и точность определения ТФСМ. Зонд выполняет следующие интеллектуальные процедуры: выбор и формирование необходимого количества тепловых импульсов, поступающих на нагреватель, коэффициента усиления усилителя и мощности теплового воздействия на ИМ в зависимости от его  $\lambda$ ; определение среднеинтегрального значения температуры  $\bar{T}$  в контактной области ИИЗ – ИМ и устранение влияния воздействия  $T_{OC}$  на результат измерения. Интеллектуальные процедуры в ИИЗ основаны на применении теории нечетких множеств при учете априорных сведений из БЗ ИИИС. Для реализации интеллектуальных процедур используется микроконтроллер МК1 с соответствующим программным обеспечением.

Структурная схема ИИЗ представлена на рис. 3.20. В состав ИИЗ входят: измерительная ячейка (ИЯ), состоящая из системы датчиков (СД) и нагревателя (Н), микроконтроллер (МК1), устройство формирования импульсов нагрева (УФИН), блок дифференциальных усилителей (ДУ1-ДУ3) БДУ, датчик температуры окружающей среды (ДТ<sub>OC</sub>). СД включает три термобатареи ТБ1, ТБ2, ТБ3, содержащие  $m$ -термодатчиков  $D_{ТБ\mu j}$ ,  $\mu \in \{1, 2, 3\}$ ,  $j \in \{1, 2, \dots, m\}$ , которые измеряют температуру соответственно в области контакта ИМ и ИИЗ и в плоскости, проходящей через линию нагревателя.

На рис. 3.21 изображена ИЯ с линейным нагревателем ИИЗ, на рис. 3.21, а показано размещение нагревателя и основной термобатареи  $D_{ТБ1}$  на поверхности теплоизоляционной подложки, на рис. 3.21, б изображено размещение вспомогательной термобатареи ТБ2 в плоскости I параллельно контактной плоскости измерительной головки термозонда и на расстоянии, равном половине толщины теплоизоляционной подложки, на рис. 3.21, в показано размещение вспомогательной термобатареи  $D_{ТБ3}$  на нормали к линии нагревателя в плоскости II, проходящей через линию нагревателя и перпендикулярной контактной плоскости измерительной головки, на рис. 3.21, г представлено соединение термопар в основной и вспомогательных термобатареях.



**Рис. 3.20. Структурная схема ИИЗ**

Измерительная ячейка (рис. 3.21) содержит цилиндрический корпус 1, конусообразно расширяющийся к основанию корпуса для обеспечения большей устойчивости термозонда. К корпусу 1 винтами 2 и 3 крепится измерительная головка 4 с теплоизоляционной подложкой 5. На поверхности теплоизоляционной подложки, контактирующей с исследуемым объектом 6, имеется канавка, в которой помещен электронагреватель 7, изготовленный из провода с высоким электрическим сопротивлением (нихром). Кроме того, на подложке 5 размещена основная термобатарея ТБ1, состоящая из дифференциальных термопар 8 и 9, 10 и 11, 12 и 13, 14 и 15.

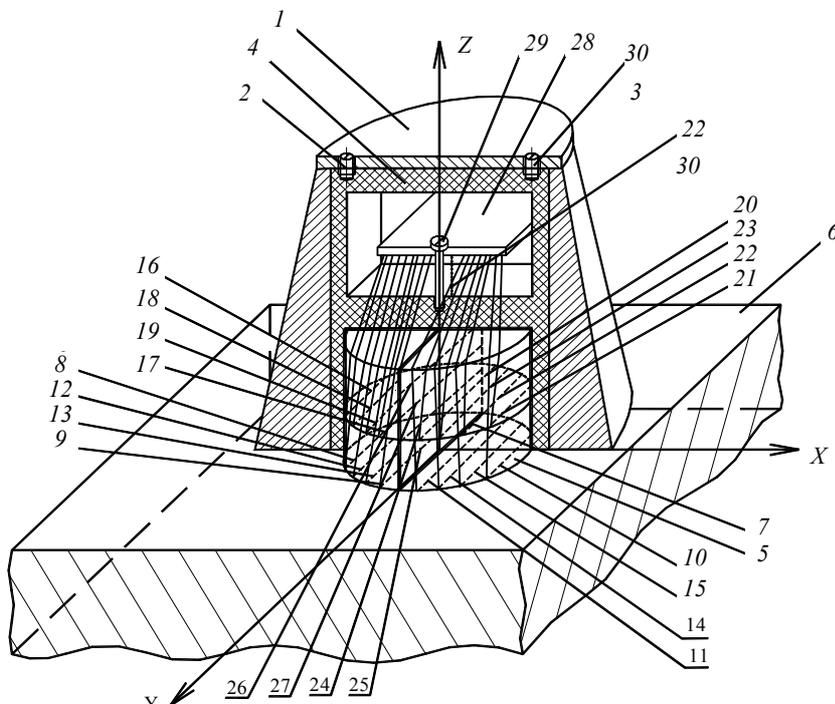
Термопары 8 и 9, 10 и 11, 12 и 13, 14 и 15 расположены (рис. 3.21, а) в канавках термоизолятора симметрично относительно линии нагревателя. Основная термобатарея предназначена для получения информации о температурно-временных изменениях в плоскости контакта измерительной головки термозонда с исследуемым объектом (области измерения).

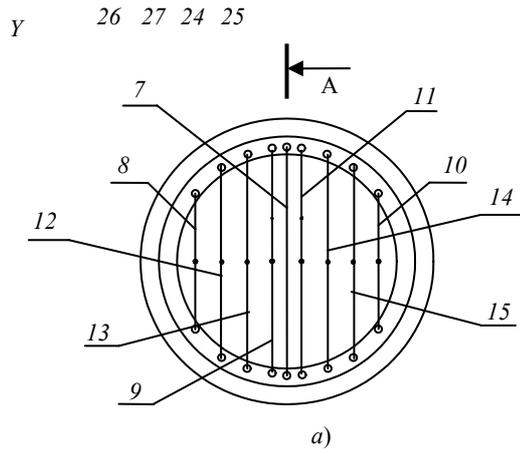
В плоскости I (рис. 3.21, б) дополнительно расположена вспомогательная термобатарея ТБ2, состоящая из термопар 16 и 17, 18 и 19, 20 и 21, 22 и 23, соединенных дифференциально. Электроды термобатарей расположены параллельно нагревателю и находятся на линиях изотерм, проходящих параллельно нагревателю.

В плоскости II дополнительно помещают на нормали к линии нагревателя вспомогательную термобатарею ТБ3, состоящую из термопар 24 и 25, 26 и 27 (рис. 3.21, в). Термопары 24 и 25, 26 и 27 помещают на нормальных расстояниях (например, 0,5...1 мм) соответственно от контактной и противоположной ей поверхности подложки. Вспомогательные термобатареи служат для контроля температурных перепадов внутри подложки измерительной головки термозонда перед началом проведения очередного измерения, так как температура подложки изменяется при неоднократном тепловом воздействии нагревателя на подложку в процессе измерений.

Термопары основной и вспомогательных термобатарей расположены на расстоянии, определяемом с учетом теплофизических свойств материала подложки измерительной головки термозонда, геометрических размеров подложки [39].

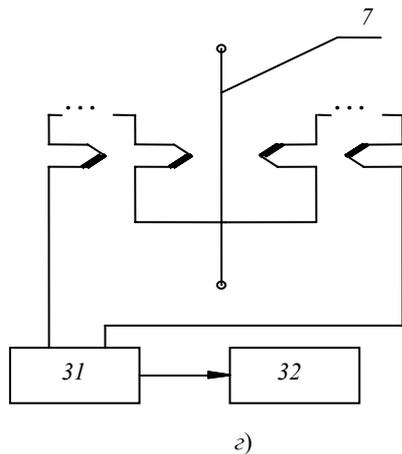
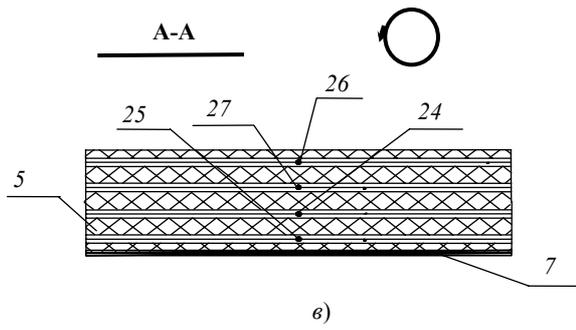
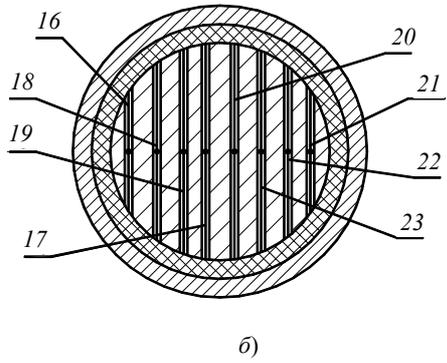
Холодные спаи всех термопар и выводы нагревателя припаиваются к разъему 28, который с помощью винта 29 крепится к измерительной головке. На винт 29 помещена пружина 30, которая обеспечивает постоянное





**Рис. 3.21. Измерительная ячейка ИИЗ:**

*a* – размещение нагревателя и основной термобатареи ТБ1 на поверхности тепло-изоляционной подложки; *б* – размещение вспомогательной термобатареи ТБ2 в плоскости I; *в* – размещение вспомогательной термобатареи ТБ3 на нормали к линии нагревателя в плоскости II; *г* – соединение термопар в основной и вспомога-



### Рис. 3.21. Окончание

Принцип действия предлагаемого ИИЗ заключается в следующем. Перед проведением очередного теплофизического измерения ИИЗ помещается на вспомогательный образец из теплоизоляционного материала, по своим свойствам близкого к материалу, из которого изготовлена подложка термозонда. Температура подложки термозонда изменяется в результате воздействия температуры окружающей среды и аккумулированного тепла в измерительной головке термозонда при неоднократном тепловом воздействии нагревателя термозонда, поэтому с помощью ИИИС осуществляется контроль перепадов температур  $\Delta T_1$  и  $\Delta T_2$  соответственно в I и II плоскостях подложки измерительной головки термозонда основной и вспомогательных термобатареями. При помощи коммутирующего устройства 31 поочередно информационные сигналы о перепадах температур в подложке термозонда  $\Delta T_1$  и  $\Delta T_2$  поступают в ИИИС 32, где программными средствами по заданному алгоритму проверяется выполнение условий  $\Delta T_1 < \varepsilon$ ,  $\Delta T_2 < \varepsilon$ , где  $\varepsilon$  – заданная величина, определяющая момент уравнивания температурных перепадов термозонда. Как показывает практика, значение  $\varepsilon$  целесообразно задавать в диапазоне 0,1...0,3 °С, так как при таких значениях  $\varepsilon$  ТФС исследуемых материалов определяется с допустимой для практики погрешностью.

В традиционных методах определение ТФС осуществляется при длительном термостатировании образца, так как теплообмен происходит только через одну грань подложки термозонда. В предложенном методе при помещении термозонда на вспомогательный образец перераспределение (уравнивание) тепла внутри подложки произойдет быстрее, чем охлаждение до температуры окружающей среды только через одну контактную поверхность термозонда. В среднем процесс термостатирования в системе термозонд-исследуемый материал занимает 10...30 минут, а в предлагаемом термостабилизации в подложке наступает в течение 2-3 минут. Следовательно, производительность проведения измерения возрастает в 5 – 10 раз. Кроме того, определяемая усредненная температура  $\Delta T_{cp}$  подложки термозонда хранится в оперативном запоминающем устройстве (ОЗУ) ИИИС для последующего использования в коррекции математической модели тепловых процессов в системе "ИИЗ – исследуемый материал".

При выполнении условий  $\max\{\Delta T_1, \Delta T_2\} < \varepsilon$  в ИИИС осуществляется индикация сигнала готовности ИЯ к проведению теплофизического измерения, т.е. фиксируется момент термостабилизации в подложке ИИЗ. Для проведения измерения ИИЗ помещается на исследуемый материал. При этом в ОЗУ ИИИС поступает информация о температуре в области контакта термозонда и исследуемого материала.

Если  $\Delta T_{cp} < \Delta T_0$ , то результирующая термоЭДС с основной термобатареи суммируется с поправкой  $\varepsilon_1 = \Delta T_{cp} - \Delta T_0$ , если же  $\Delta T_{cp} > \Delta T_0$ , то поправка  $\varepsilon_1$  вычитается из результирующей термоЭДС, где  $\Delta T_{cp}$  – средняя избыточная температура в области измерения перед проведением очередного измерения;  $\Delta T_0$  – температура в области измерения при нормальных условиях окружающей среды.

Для проведения теплофизического измерения с помощью аппаратных и программных средств ИИИС на нагреватель ИИЗ поступают импульсы постоянной определенной мощности, в зависимости от класса ИМ, осуществляющие нагрев исследуемого материала. При этом с основной термобатареи термозонда производится съем информации об избыточной температуре в области измерения и передача этой информации в ОЗУ ИИИС. После окончания процесса нагрева выполняется расчет по известным соотношениям искомых теплофизических характеристик исследуемого объекта на основе полученной информации о температурно-временных изменениях в области измерения. При этом осуществляется коррекция результатов измерения по вышеприведенной методике при изменении температуры окружающей среды. Введение коррекции результатов измерения позволяет получать достоверную информацию с термозонда о температуре в области измерения независимо от воздействия температуры окружающей среды, так как при этом

учитывается поправка  $\Delta T_0$  как в подложке термозонда, так и в области измерения.

Независимость показаний термодатчиков в подложке ИЯ при воздействии температуры окружающей среды обеспечивается с помощью известного метода компенсации холодных спаев термопар [24], при котором холодные спаи термопар в процессе измерения должны находиться при одной температуре. В данном случае холодные спаи основной термобатареи и вспомогательных термобатареи размещены на одном разъеме 28.

Рассмотренный выше ИИЗ позволяет уменьшить инструментальную погрешность определения ТФСМ за счет определения среднеинтегрального значения температуры в области измерения и в подложке термозонда, введения поправок на контактное термосопротивление, термокомпенсации влияния температуры окружающей среды на результаты измерений, а также за счет уменьшения оттока тепла от зоны измерения температуры по электродам термочувствительных элементов.

Кроме того, дифференциальное соединение основной термобатареи исключает влияние теплообменного процесса между ИЯ и ИМ на выходную измерительную информацию с основной дифференциальной термобатареи, т.е. рабочие дифференциальные термобатареи фиксируют и выдают информацию только о температурно-временных изменениях (температурном поле) от действия линейного импульсного источника тепла. Таким образом, на полученную измерительную информацию в следующих экспериментах не оказывает влияния остаточное, аккумулированное в подложке зонда тепло, от предыдущего измерения, т.е. полученная измерительная информация позволяет определить ТФС следующего исследуемого материала без влияния на результат измерения предыдущих экспериментов.

Интеллектуальная процедура по адаптации мощности теплового воздействия к ИМ и формированию оптимального количества тепловых импульсов, подаваемых на ИМ, осуществляется с помощью УФИН. Для этого вначале на исследуемом материале снимается тестовая термограмма при средней мощности теплового воздействия и минимальном количестве тепловых импульсов для данного класса ИМ. Затем проводится сравнение тестовой термограммы с имеющимися в памяти микроконтроллера МК1. По результатам сравнения программным способом выбирается алгоритм функционирования интеллектуальной информационно-измерительной системы, для которого заданы количество тепловых импульсов и подаваемое напряжение на нагреватель ИЯ. Информация о выбранном алгоритме ( $S_{ИИС}$ ) сообщается в МК1. Микроконтроллер вырабатывает для УФИН следующие управляющие сигналы:  $S_{МК1}$ , который открывает и закрывает управляющий логический элемент в УФИН для прохождения оптимального количества тепловых импульсов в соответствии с выбранным алгоритмом работы ИИС;  $S_{МК2}$ , позволяющий открыть один из управляющих логических элементов, на которые поступают напряжения с блока питания  $U_{БП_N}$  (здесь  $N$  – число подаваемых напряжений).

Интеллектуальные процедуры по определению среднеинтегрального значения температуры  $\bar{T}$  в контактной области ИИЗ и ИМ и выбора коэффициента усиления ДУ заключаются в следующем. Результаты тестовой термограммы сравниваются с данными термограмм для ИМ с различной теплопроводностью  $\lambda$  и соответствующим коэффициентом усиления, заложенными в память МК1. По результатам сравнения в МК1 программным способом выбирается коэффициент усиления  $K_{jd}$ . Например, для ИМ с  $\lambda$  от 0,028 до 1 Вт/(м·К) предусмотрены три диапазона усиления с коэффициентами  $K_{1d}$ ,  $K_{2d}$ ,  $K_{3d}$ , здесь  $d$  – диапазон значения  $\lambda$  ИМ. В общем случае, по результатам сравнения в микроконтроллере программным способом выбирается коэффициент усиления  $K_{jd}$  из диапазона  $\{K_{1d}, K_{2d}, \dots, K_{ld}\}$ , где  $l$  – число диапазонов. При этом на управляющие логические элементы в цепи ДУ, которые подключены к резисторам, определяющим выбранный  $K_{ld}$ , поступает управляющий сигнал с микроконтроллера  $S_{МК3}$ . Таким образом ДУ будут работать в заданном диапазоне усиления входного сигнала для каждого ИМ, что позволит ДУ функционировать при изменении мощности теплового воздействия на ИМ с различной теплопроводностью и получать более достоверную информацию о ТФСМ ИМ.

С выхода блока дифференциальных усилителей суммарный и усиленный сигнал (с ИЯ)  $K_{jd} U_{ТБΣ}$  поступает на вход МК1, где рассчитывается по соответствующей программе значение напряжения с ИЯ  $\overline{U}_{ТБ}$ .

Интеллектуальная процедура устранения влияния температуры окружающей среды на результат измерения ТФСМ состоит из двух этапов. На первом этапе осуществляется сравнение начального значения  $\overline{U}_{ТБ}$  с тестовым значением, хранящемся в памяти микрокалькулятора. На втором этапе, если эти значения равны, то информация о среднеинтегральном значении температуры в области контакта ИМ и ИИЗ поступает в микроконтроллер МК2 для расчета ТФСМ. Если  $\overline{U}_{ТБ}$  отличается от тестового значения, то этот сигнал поступает на инвертирующий вход ДУ, на неинвертирующий вход которого подается также сигнал с датчика температуры окружающей среды  $U_{Тос}$ . В результате на выходе ДУ формируется усиленная разность сигналов  $K_{ДУ} (\overline{U}_{ТБ} - U_{Тос})$ . Полученная таким образом информация с устранением воздействия  $T_{ос}$  поступает в память микроконтроллера МК2 и используется для расчета искомых ТФСМ.

Таким образом, созданный интеллектуальный измерительный зонд осуществляет адаптацию ИИС НК ТФСМ под широкий класс исследуемых твердых материалов, устраняет влияние воздействия на результат измерения основного дестабилизирующего фактора – температуры окружающей среды, проводит интеллектуальную обработку экспериментальных температурно-временных функций, исключает влияние на измерительную информацию аккумулированного в подложке ИИЗ тепла от предыдущего измерения, что позволяет повысить оперативность и метрологическую точность результатов измерения ТФСМ.

Интеллектуализация измерительного зонда обусловлена наличием МК1, программное обеспечение в котором позволяет осуществлять алгоритм функционирования ИИЗ и функции первичной обработки измерительной информации.

Экспериментальная проверка показала работоспособность предложенной конструкции ИИЗ. Инструментальная погрешность этого зонда, по сравнению с известными конструкциями, уменьшилась в среднем на 4...5 %.

### 3.6. СТРУКТУРНАЯ СХЕМА ИИИС НК ТФСМ

Современное развитие технических и программных средств создают условия для разработки и внедрения интеллектуальных информационно-измерительных систем НК ТФСМ. Интеллектуализация ИИС неразрушающего контроля теплофизических свойств материалов позволяет расширить функциональные возможности ИИС и оперативность НК ТФСМ. Для этого предлагается применение искусственного интеллекта в основных устройствах ИИС – измерительного зонда и вычислительного устройства на основе микроконтроллера, а также в применяемом методе НК ТФСМ [59].

Разработана интеллектуальная информационно-измерительная система НК ТФСМ, интеллектуальные измерения в которой предполагают использование постоянно пополняемой базы данных, автоматическую обработку априорной и постаприорной информации о классах измерительных ситуаций, что позволяет на основе промежуточных (тестовых) измерений формировать наиболее эффективный алгоритм определения ТФС ИМ с допустимой погрешностью [22, 43, 48, 60, 61].

Проектирование интеллектуальной ИИС НК ТФСМ выполнено, используя положительный опыт создания адаптивных измерительно-вычислительных систем НК ТФСМ [28, 37, 44 – 46, 51, 62 – 66].

Предлагаемая ИИИС образует три функциональные группы. Нижняя группа включает первичные преобразователи – датчики (термопары) с выходным электрическим сигналом. Вторая группа системы представляет собой аппаратные средства с соответствующей программной поддержкой. Третья группа системы составляет ее методическое, алгоритмическое и программное обеспечение. Первая и третья группы могут преобразовываться по отношению к различным способам построения и функциональному назначению ИИИС.

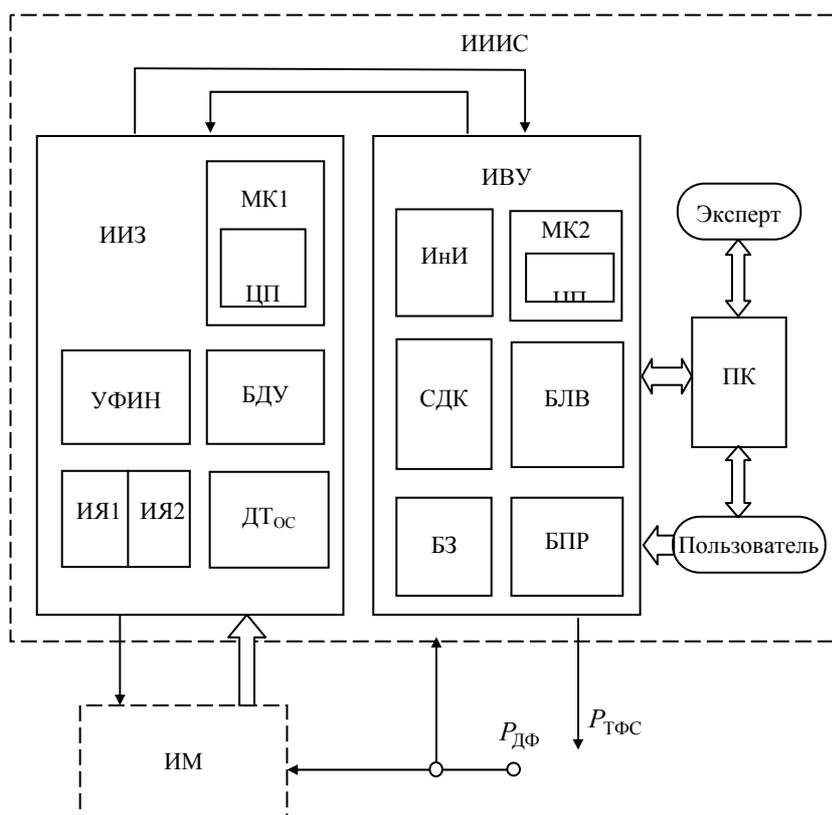
Структурная схема предлагаемой ИИИС НК ТФСМ представлена на рис. 3.22 [67].

ИИИС включает следующие устройства: ИИЗ, состоящий из МК1 со встроенным аналого-цифровым преобразователем (АЦП), УФИН, БДУ – блока дифференциальных усилителей, ИЯ1, ИЯ2, ДТ<sub>ос</sub>; ИВУ – интеллектуальное вычислительное устройство, включающее БЗ, ИнИ – интеллектуальный интерфейс, БПР – блок принятия решений, СДК – систему допускового контроля, МК2, ЖКИ – жидкокристаллический индикатор, Кл – клавиатуру; БЛВ – блок логического вывода; ПК – персональный компьютер.

Интеллектуальный измерительный зонд выполняет следующие интеллектуальные процедуры: определение среднеинтегрального значения температуры в контактной области ИИЗ и ИМ, устранение воздействия температуры окружающей среды на результаты измерения, формирование необходимого количества тепловых импульсов, поступающих на нагревательный элемент ИИЗ, осуществление перестройки диапазона усиления усилителя в зависимости от теплопроводности ИМ.

Отличительными особенностями интеллектуального зонда является наличие микроконтроллера МК1, реализующего интеллектуальные функции выбора из результатов измерений термодатчиками температурного поля в области контакта ИИЗ и ИМ информации о температуре с учетом воздействия основного ДФ – температуры окружающей среды, адаптации к классу исследуемых материалов.

Многоканальный АЦП позволяет в соответствии с заданным алгоритмом осуществить многоканальный ввод информации с ИИЗ в МК2 для последующей обработки.



**Рис. 3.22. Структурная схема ИИИС НК ТФСМ**

Интеллектуальное вычислительное устройство реализуется на микроконтроллере PIC18F8720. МК обладает высоким быстродействием, так как с помощью многоканальных портов ввода–вывода реализуется параллельный ввод информации, все команды выполняются за один цикл, памяти МК достаточно для реализации интеллектуальных процедур в ИИИС. ИВУ реализует интеллектуальные процедуры по управлению теплофизическими измерениями, принятию решений в ИИИС в нечеткой среде, метрологиче-

скому автосопровождению измерительных процедур, синтезу измерительных цепей и каналов в ИИИС.

Интеллектуальный интерфейс позволяет обеспечить выборку необходимой информации из базы знаний, не присутствующей в явном виде, выводимой из совокупности хранимых данных.

База знаний содержит совокупность априорной и текущей информации об исследуемых материалах и изделиях из них, о классах измерительных ситуаций, методах и алгоритмах измерения, аппроксимирующих функциях зависимости теплопроводности исследуемых материалов от воздействия дестабилизирующих факторов, метрологического обеспечения, алгоритмах принятия решений ИИИС в условиях неопределенности.

Блок принятия решений осуществляет интеллектуальную процедуру по оценке ситуации и в результате принимает решение по выбору метода и алгоритма теплофизического измерения в зависимости от класса теплопроводности исследуемых материалов и изделий, мощности теплового воздействия, диапазона усиления измерительного усилителя, структуры ИИИС. Принятие решений основывается на априорной информации об исследуемом материале и на метрологическом анализе результатов измерения, сопровождающем измерительные процедуры.

Применение интеллектуальных технологий в ИВУ позволяет создать модели представления знаний в ИИС (фреймы), применить теорию нечетких множеств при пользовании неточными знаниями, а также осуществить функции принятия решений при реализации алгоритма функционирования ИИС НК ТФСМ.

Интеллектуализация метода для определения ТФС материалов заключается в определении оптимальных режимно-энергетических параметров на основе анализа имеющейся в базе знаний ИИС априорной информации о ИМ, оценке измерительной ситуации, использования полученных и хранящихся в базе данных расчетно-экспериментальных зависимостей времени достижения установившегося теплового режима в области контакта ИМ и ИЗ ( $\tau_{уст}^*$ ) и показателя достижения установившегося теплового режима ИМ ( $\beta^*$ ), оптимального количества тепловых импульсов ( $n^*$ ), времени достижения температуры усреднения в тепловой системе «ИИЗ – вспомогательный образец»  $\tau_{уср}^*$ .

Принцип действия ИИИС заключается в следующем. Процесс теплофизического измерения начинается с идентификации параметров исследуемого материала при воздействии на него дестабилизирующих факторов, оказывающих наибольшее влияние на результаты измерения ТФСМ и классе измерительной ситуации. При изучении данных метрологического анализа, имеющихся в базе знаний в ИИИС, выявлено, что основными составляющими полной погрешности результатов измерения ТФСМ являются: погрешность от воздействия изменения температуры окружающей среды ( $T_{oc}$ ), влажности, контактного термосопротивления, шероховатости поверхности. При этом около 50 % погрешности в результат измерения вносит температура окружающей среды. Задачу исключения влияния  $T_{oc}$  решает ИИЗ, который помещается на исследуемый материал. При этом осуществляется контроль температуры в системе «ИИЗ-ИМ». После этого осуществляют нагрев материала и снятие тестовой термограммы, позволяющей определить предварительную теплопроводность ИМ по соотношению (3.20) и ДФ на основе информации о температурно-временных изменениях в области измерений. Полученные значения ДФ записываются в СДК ИВУ. На основе полученной термограммы БПР в ИВУ принимает решение о выборе класса измерительной ситуации и, в соответствии с этим, метода и алгоритма измерений, мощности теплового воздействия, диапазоне усиления измерительного усилителя, оптимальных параметрах теплофизического измерения, методе метрологического решения, синтезе структуры ИИИС. Таким образом осуществляется структурно-параметрическая адаптация по режимно-энергетическим параметрам. Затем проводится теплофизическое измерение, которое осуществляется по синтезированному алгоритму НК ТФСМ с помощью программных и схмотехнических средств. При осуществлении теплового воздействия блоком управления нагревом ИИЗ на ИМ информация о температурном поле в области контакта ИИЗ и ИМ поступает в ИВУ ИИИС, где по соотношению (3.20) рассчитываются искомые ТФСМ. ИВУ, используя БЗ, где заложены аппроксимирующие функции зависимости те-

плопроводности материалов от ДФ выполняет коррекцию результатов определения ТФСМ. Далее выполняется метрологический анализ результатов измерения и сравнение с параметрами ТФСМ, заложенными в СДК БЗ [68]. Если погрешность определения ТФСМ превышает допустимое значение, то БПР ИИИС принимает решение о коррекции алгоритма теплофизического измерения и проводит повторные измерения, сопровождающиеся метрологическим анализом, до получения результатов о ТФСМ с погрешностью измерения не более 3...4 %.

ИИИС обеспечивают измерения в средах с постоянной и переменной температурой, реализовывают импульсные методы определения теплофизических свойств материалов при действии линейного и плоского источников тепла, получая при этом комплексную экспресс-информацию о ТФСМ, причем результаты измерений сравниваются с прогнозируемыми, т.е. имеет место обратная связь.

Применение разработанной интеллектуальной информационно-измерительной системы позволяет определять теплофизические свойства материалов в широком диапазоне теплопроводности: строительных материалов, теплоизоляционных, металлополимеров и других материалов с прогнозируемой погрешностью, а также применять ИИИС для автоматизированного процесса разработки технологии производства твердых материалов.

Таким образом, интеллектуализация ИИС повышает в целом эффективность применения информационно-измерительной системы для НК ТФСМ.

### 3.7. ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ СХЕМА ИИИС НК ТФСМ

ИИИС НК ТФСМ осуществляет интеллектуальную обработку температурно-временных функций и вычислений ТФС исследуемого материала; автоматическую регистрацию результатов и условий выполнения измерений, а также возможность просмотра результатов по номерам и датам; возможность адаптации ИИИС под любые виды материалов [53, 54, 69, 70].

ИИИС оснащена специализированным контроллером, который обеспечивает автоматизированное управление теплофизическими измерениями и электронно-вычислительную обработку информации.

Предлагаемая ИИИС НК ТФСМ и ее различные модификации обладают высокими техническими и эксплуатационными характеристиками (производительность, метрологическая обеспеченность, помехозащищенность, гибкость архитектуры и стандартизация технического и программного обеспечения). Решает следующие задачи: многоканальное преобразование электрических параметров в электрические сигналы (цифровой код) посредством датчиков и аналого-цифрового преобразования, предварительная обработка в реальном времени, формирование массивов данных; вторичная обработка полученных массивов данных с помощью специализированных пакетов прикладных программ для решения вопросов прогнозирования, идентификации и управления теплофизическими измерениями в объектах диагностики; формирование сигналов управления и тестирования по результатам первичной и вторичной обработки входной информации, отображение входных сигналов (в реальном времени) и результатов обработки на экране дисплея [43, 44, 47, 53, 54, 60, 59].

Основными показателями эффективности информационно-измерительных систем для определения теплофизических свойств твердых материалов являются повышение точности и оперативности измерения ТФСМ. В предлагаемой ИИИС НК ТФСМ повышение эффективности функционирования достигается за счет применения методов искусственного интеллекта в решении задач уменьшения погрешности результатов измерения ТФСМ в результате влияния дестабилизирующих факторов, адаптации по режимным и энергетическим параметрам к ИМ, прогнозирования погрешности измерений. При этом расширяется диапазон определения ТФС исследуемых материалов и изделий.

Функциональная схема разработанной ИИИС НК ТФСМ представлена на рис. 3.23 [71].

Алгоритм функционирования интеллектуальной информационно-измерительной системы реализуется следующими блоками и устройствами: интеллектуальным вычислительным устройством, в состав которого входит

микроконтроллер (МК2), база знаний, блок принятия решений, клавиатура, жидкокристаллический индикатор; интеллектуальным измерительным зондом, блоком дифференциальных усилителей, устройством формирования импульсов нагрева, блоком питания, с которого поступают напряжения питания на микроконтроллер ( $U_{МК}$ ), клавиатуру ( $U_{Кл}$ ), ЖКИ ( $U_{ЖКИ}$ ). ИВУ выполнено на основе микроконтроллера PIC18F8720, который характеризуется высоким быстродействием и большой памятью, многоканальным портом параллельного ввода-вывода информации. Разработано программное обеспечение, позволяющее осуществлять индикацию информации жидкокристаллическим индикатором с клавиатуры и микроконтроллера.

Теплофизическое измерение проводится с помощью ИИЗ (раз-дел 3.5), интеллектуальной функцией которого является адаптация под класс ИМ, определение среднеинтегрального значения температуры, определяемой термодатчиками (дифференциальными термодарами), расположенными в разных точках по всему объему подложки ИИЗ. Кроме того, интеллектуальной функцией ИИЗ является устранение влияния температуры окружающей среды на результат измерения и формирование импульсов нагрева в ИИЗ.

При измерении используется метод НК ТФСМ, принцип действия которого заключается в тепловом воздействии линейного нагревателя термозонда на поверхность исследуемого материала импульсами заданной частоты и мощности.

Первоначально по тестовой термограмме при заданной средней мощности теплового воздействия рассчитывается теплопроводность исследуемого материала. При этом осуществляется идентификация основных дестабилизирующих факторов, влияющих на результат измерения ТФСМ, и класса измерительной ситуации, информация о которых находится в БЗ.

База знаний содержит совокупность априорной информации ( $I_{БЗ}$ ) об ИМ, о классах измерительных ситуаций, методах и алгоритмах измерения, аппроксимирующих функциях зависимости теплопроводности исследуемых материалов от воздействия ДФ, метрологическом обеспечении. На этапе формализации осуществляется представление основных понятий и отношений БЗ на основе фреймовой структуры.

БПР осуществляет интеллектуальную процедуру ( $S_{ИП}$ ) по оценке ситуации и в результате принимает решение по выбору метода и алгоритма теплофизического измерения в зависимости от класса теплопроводности ИМ, диапазона усиления измерительного усилителя, мощности теплового воздействия.

Необходимое количество тепловых импульсов, подаваемых на ИМ, определяется с помощью применяемого в ИИИС интеллектуального метода НК ТФСМ (см. раздел 3.3).

Тепловые импульсы с УФИН ( $\Delta L$ ) заданных частоты, мощности и интервала следования, согласно выбранному БПР алгоритму функционирования ИИИС, поступают на ИИЗ, помещенный на ИМ. С ИМ информация с термодатчиков о температурном поле в плоскости контакта ИИЗ и ИМ ( $U_{ТИ}$ ) фиксируется и обрабатывается в ИИЗ, и ее среднеинтегральное значение ( $U_{ТИ}$ ) поступает в БДУ с переменным коэффициентом  $K$ , а затем на МК ( $KU_{ТИ}$ ).

В ИВУ в соответствии с математической моделью, выбранной БПР для данного теплофизического измерения из БЗ, выполняется расчет ТФСМ. При этом осуществляется коррекция результатов измерения на воздействие ДФ [11]. Затем проводится метрологический анализ полученных результатов ТФСМ и сравнение их с допустимыми значениями погрешности измерения для ИМ.

### 3.8. АЛГОРИТМ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ИИИС НК ТФСМ

Блок-схема алгоритма функционирования ИИИС НК ТФСМ приведена на рис. 3.24 [54, 72].

Перед началом измерения в базу знаний заносится априорная информация АИ об ИМ  $\psi$ ,  $M(N_{АИ})$ . Теплофизическое измерение начинается с измерительной процедуры идентификации параметров ИМ при воздействии ДФ, оказывающих наибольшее влияние на результат измерения

ТФСМ. Как уже рассматривалось в разделе 3.1, к ним относятся  $T_{OC}$ ,  $W$ ,  $R_T$ ,  $\psi$ .

Первая измерительная процедура (ИП1) заключается в следующем. ИИЗ помещается на вспомогательный образец из материала, близкого по теплофизическим свойствам к материалу подложки ИИЗ (рипор).

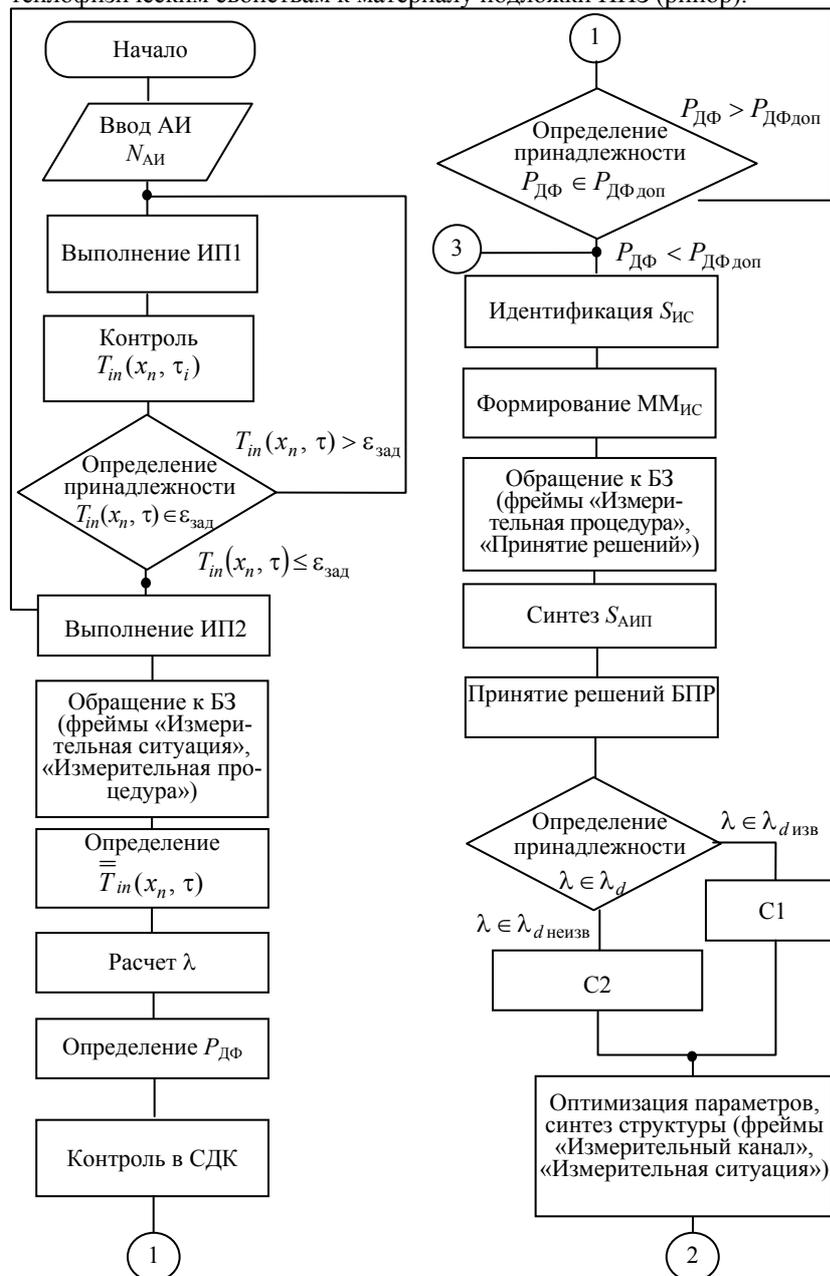
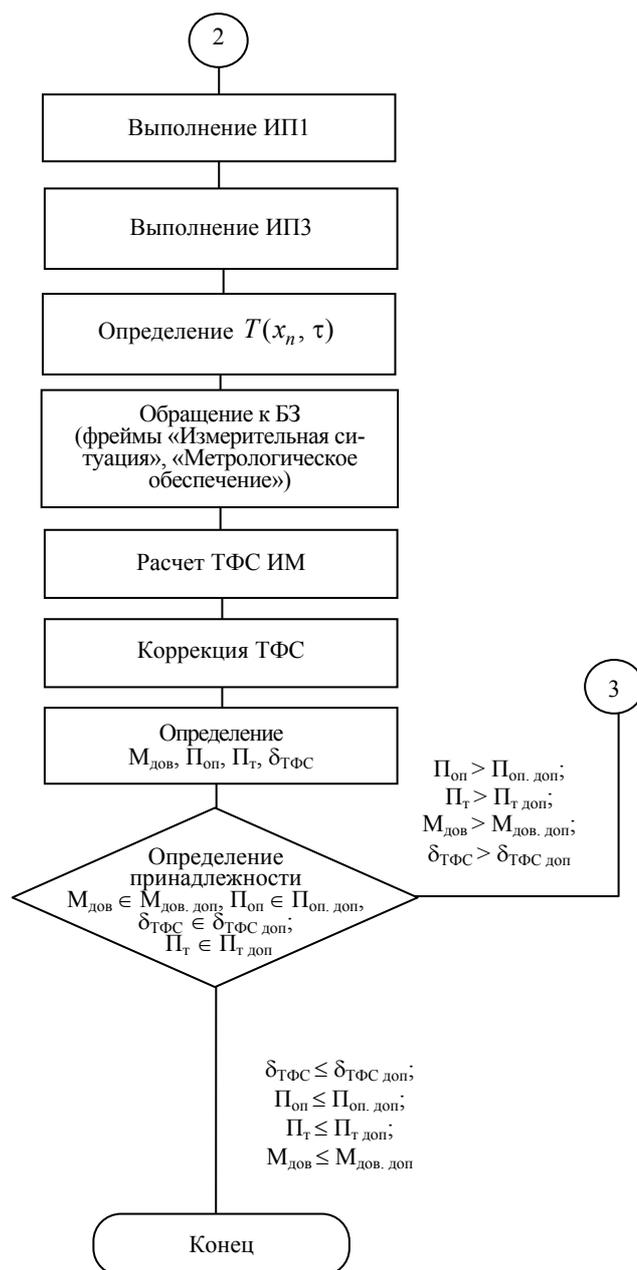


Рис. 3.24. Блок-схема алгоритма функционирования ИИИС НК ТФСМ



**Рис. 3.24. Окончание**

Далее осуществляют контроль температуры в области контакта ИИЗ и вспомогательного образца  $T_{in}(x_n, \tau_i)$ , где  $i = 1, 2$ ,  $x_n$  – расстояние от нагревателя до точки контроля. При этом осуществляют сравнение измеренной температуры  $T_{in}(x_n, \tau_i)$  с заданным значением  $\varepsilon_{зад}$ , определяющим уравнение температуры в области контакта ИИЗ и вспомогательного образца из рипора. Если  $T_{in}(x_n, \tau) > \varepsilon_{зад}$ , то продолжают контроль температуры. Если  $T_{in}(x_n, \tau) \leq \varepsilon_{зад}$ , то ИИЗ помещают на ИМ для снятия тестовой термограммы (измерительная процедура 2(ИП2)).

Тестовая термограмма позволяет получить первичную измерительную информацию о теплопроводности ИМ, о воздействующих дестабилизирующих факторах и определить измерительную ситуацию.

Чтобы провести теплофизическое измерение и снять тестовую термограмму, необходимо обратиться к базе знаний, чтобы получить информацию о выборе усредненного времени нахождения ИИЗ на вспомогательном образце ( $\tau_{уср}$ ), мощности теплового воздействия на ИМ, количества тепловых импульсов, напряжения, подаваемого с блока питания на нагреватель ИИЗ ( $U_{БП}$ ) и коэффициенте усилителя  $K_d$  по данным для класса изоляторов в диапазоне  $\lambda$  от 0,02 до 0,04 Вт/(м·К).

По результатам термограммы определяется среднеинтегральное значение температуры в области контакта ИИЗ и ИМ, на основе которого определяется предварительное значение коэффициента теплопроводности  $\lambda$ .

По имеющимся зависимостям в базе знаний  $\lambda = f(\psi)$ ,  $\lambda = f(R_T)$ ,  $\lambda = f(T)$ ,  $\lambda = f(W)$ , получаем первичную измерительную информацию о ДФ ( $\psi$ ,  $R_T$ ,  $T$ ,  $W$ ) ( $P_{ДФ}$ ). Затем осуществляется анализ принадлежности  $P_{ДФ}$  к области допустимых значений, записанных в СДК. Если в результате сравнения значения  $P_{ДФ} > P_{ДФ\ доп}$ , то измерительная процедура повторяется, если  $P_{ДФ} < P_{ДФ\ доп}$ , то проводится идентификация класса измерительной ситуации  $S_{ИС}$ . В результате определения измерительной ситуации формируется математическая модель измерительной ситуации ( $ММ_{ИС}$ ).

Далее следует обращение к БЗ за информацией, необходимой для синтеза алгоритма измерений. Синтез алгоритма измерительной процедуры ( $S_{АИП}$ ) осуществляет блок принятия решений (БПР). БПР выполняет интеллектуальную процедуру по оценке ситуации и в результате принимает решение по выбору метода и алгоритма теплофизического измерения, о синтезе структуры ИИИС в зависимости от класса теплопроводности ИМ (ИИЗ с линейным или круглым нагревателем в зависимости от значения  $\lambda$ ), мощности теплового воздействия  $Q_{ТВ}$  (количества тепловых импульсов  $n$ ,  $U_{БП}$ ), диапазона усиления измерительного усилителя  $K_d$ . При этом, если  $\lambda$  определено с достаточной мерой доверия к результатам измерения  $\lambda \in \lambda_{d\ изв}$  (см. раздел 2.7), то количество импульсов теплового воздействия  $n$  определяется в интеллектуальном методе (см. раздел 3.3) по зависимости времени достижения установившегося теплового равновесия в области контакта ИИЗ и ИМ от теплопроводности ИМ  $\tau_{уст} = f(\lambda)$  (рис. 3.13) (по первому способу) (С1). Если  $\lambda$  неизвестно,  $\lambda \in \lambda_{d\ неиз}$ , то установившийся тепловой режим определяется в результате сравнения разности среднеинтегральных температур, снимаемых двумя термобатареями в ИЯ ИИЗ по второму способу (С2).

$$\Delta \bar{T}_{cp}(\lambda) = \bar{T}_i - \bar{T}_{i-1} < \beta,$$

где  $\beta = f(\lambda)$  определяется по зависимости, приведенной на рис. 3.17.

Далее повторяется измерительная процедура ИП1, т.е. ИИЗ помещается на вспомогательный образец и осуществляется контроль и принадлежность  $T_{in}(x_n, \tau)$  к  $\varepsilon_{зад}$ .

После этого ИИЗ помещается на ИМ и проводится измерительная процедура 3 (ИПЗ), заключающаяся в следующем. Выполняется теплофизическое измерение в соответствии с выбранной измерительной ситуацией и методом измерения. На основе температурно-временных характеристик в области контакта ИИЗ и ИМ для среднеинтегральных значений температур рассчитываются теплофизические свойства ИМ. Затем осуществляется обращение к БЗ за информацией о зависимости ТФСМ от воздействующих ДФ ( $R_T$ ,  $\psi$ ,  $W$  и  $T$ ). Учитывая эту информацию, проводится коррекция результатов измерения ТФС ИМ.

Далее выполняется метрологический анализ результатов измерения. Рассчитывается относительная погрешность результатов измерения ( $\delta_{ТФС}$ ) и сравнение ее с допустимой погрешностью ( $\delta_{ТФС\ доп}$ ).

Определяются меры доверия к результатам измерения ( $M_{дов}$ ), потери точности ( $\Pi_T$ ) и оперативности ( $\Pi_{оп}$ ).

Если  $\delta_{ТФС} > \delta_{ТФС\ доп}$ ,  $\Pi_{оп} > \Pi_{оп\ доп}$ ,  $\Pi_T > \Pi_{Т\ доп}$ ,  $M_{дов} > M_{дов\ доп}$ , то повторяется анализ измерительной ситуации и ИПЗ.

Если  $\delta_{ТФС} \leq \delta_{ТФС\ доп}$ ,  $\Pi_{оп} \leq \Pi_{оп\ доп}$ ,  $\Pi_T \leq \Pi_{Т\ доп}$ ,  $M_{дов} \leq M_{дов\ доп}$ , то результаты измерений ТФС ИМ выводятся на индикацию.

В процессе сбора и обработки измерительной информации ИИИС может корректировать алгоритм своего функционирования на основе использования промежуточной информации.

Для ИИИС разработано программное обеспечение (ПО), позволяющее реализовать алгоритм функционирования ИИИС, получено свидетельство о официальной регистрации программы [69, 72].

Применение ИИИС с различными тепловыми моделями, их анализ и синтез алгоритмов определения ТФСМ рассматривались в работе [63, 68].

Перед проведением теплофизического измерения реализуется идентифицирующая стратегия, т.е. осуществляется идентификация параметров исследуемого материала.

Идентификация параметров исследуемого материала при воздействии на него основных дестабилизирующих факторов (изменение температуры окружающей среды, влажности, контактного термосопротивления, шероховатости поверхности) устанавливает отклонение параметров ИМ исследования и ИИИС от параметров при нормальных условиях эксплуатации, а применение корректирующей стратегии позволяет осуществить адаптацию ИИИС, т.е. коррекцию алгоритма теплофизического измерения в зависимости от класса теплопроводности исследуемых материалов и изделий, а также автоматическую коррекцию результатов измерения.

Как известно, вследствие шероховатости и волнистости реальных поверхностей исследуемых материалов и изделий контакт между твердыми телами всегда имеет дискретный характер, т.е. соприкосновение происходит в отдельных точках или группах точек поверхности. Отсутствие сплошности контакта при соприкосновении ИИЗ и исследуемого материала существенно меняет картину передачи тепла от одного тела к другому при теплофизических измерениях, что в итоге влияет на достоверность получаемой измерительной информации в области измерения. Поэтому в ИИИС необходимо введение коррекции результатов измерения как на наличие контактного сопротивления, так и шероховатости исследуемых материалов.

При контроле шероховатости поверхности производится интегральная оценка поверхностных дефектов. Для определения шероховатостей изделий и материалов применяют в основном интерференционные приборы. Принцип действия интерферометров основан на сравнении световых волн, получаемых при отражении когерентных пучков света от контролируемой и эталонной поверхности [73]. Прибор позволяет одновременно наблюдать две интерференционные картины, одна из которых формируется изделием, а вторая – эталоном шероховатости. О шероховатости изделия судят по степени различия этих картин согласно известным градуировочным характеристикам.

Для повышения точности измерения шероховатости выполнено усовершенствование принципа действия данного прибора, заключающееся в том, что предварительно определяется теплопроводность исследуемых изделий, оценивается степень черноты изделия, а затем вводится коррекция на их отклонение от градуировочных значений при определении шероховатости поверхности изделия.

Диапазон величин шероховатости поверхности установлен ГОСТ 2789–73. Значение полученной величины  $\psi_i(x_i, \tau_i)$  заносится в базу знаний ИИИС.

На рис. 3.25 представлены зависимости теплопроводности исследуемых материалов от шероховатости их поверхности  $\lambda = f(\psi)$ . Соответствующие им аппроксимирующие функции  $\tilde{\lambda} = F(\psi)$ , на основе которых осуществляется коррекция результатов определения ТФСМ, имеют следующий вид:

а) для ПММ

$$\tilde{\lambda} = F(\Psi) = 0,0035\Psi^3 - 0,0053\Psi^2 + 0,0031\Psi + 0,199 ;$$

б) для линолеума

$$\tilde{\lambda} = F(\Psi) = 8,88 \cdot 10^{-4}\Psi^3 - 0,0012\Psi^2 + 0,0055\Psi + 0,098 ;$$

в) для винилискожи

$$\tilde{\lambda} = F(\Psi) = 0,0035\Psi^3 - 0,0082\Psi^2 + 0,0052\Psi + 0,069 ;$$

г) для пенопласта

$$\tilde{\lambda} = F(\Psi) = 8,88 \cdot 10^{-4}\Psi^3 - 6,58 \cdot 10^{-4}\Psi^2 + 0,0036\Psi + 0,029 ;$$

д) для рипора

$$\tilde{\lambda} = F(\Psi) = 8,88 \cdot 10^{-4}\Psi^3 - 1,38 \cdot 10^{-4}\Psi^2 + 0,0032\Psi + 0,024 .$$

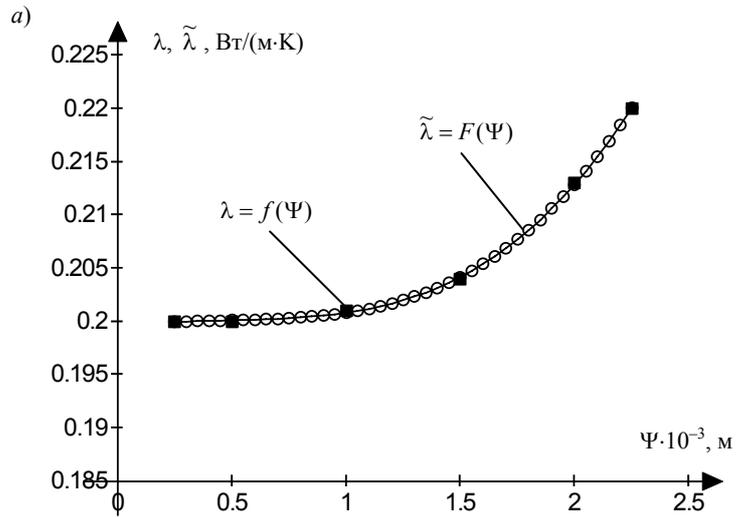
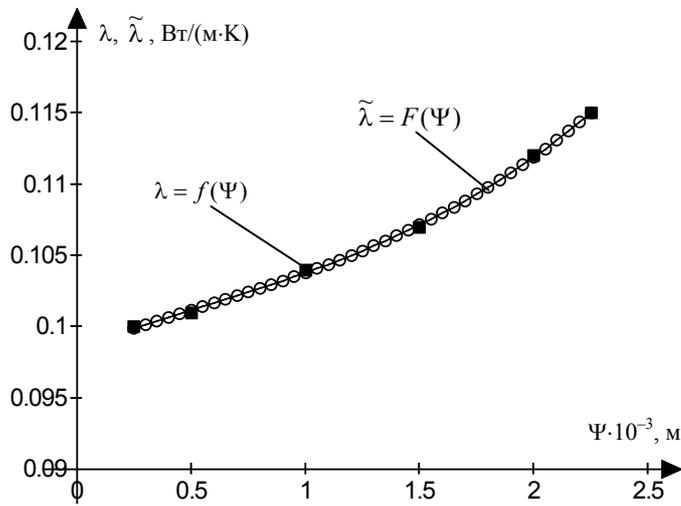


Рис. 3.25. Зависимости результатов измерения теплопроводности от шероховатости поверхности:

*a* – ПИММ; *б* – линолеума; *в* – винилискожи; *г* – пенопласта; *д* – рипора

*б*)



*в*)

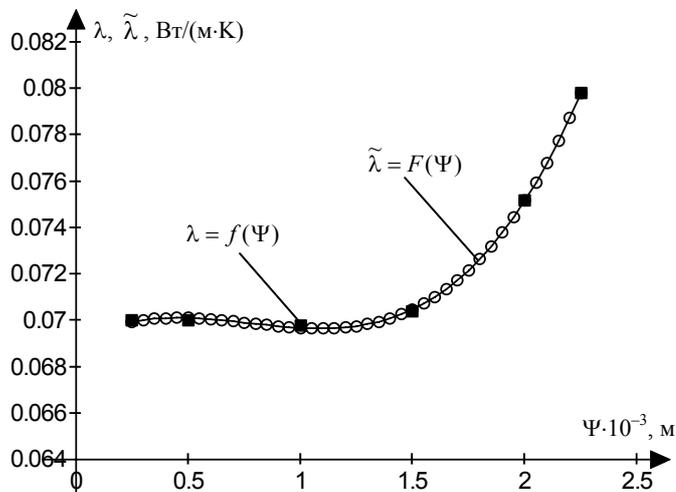
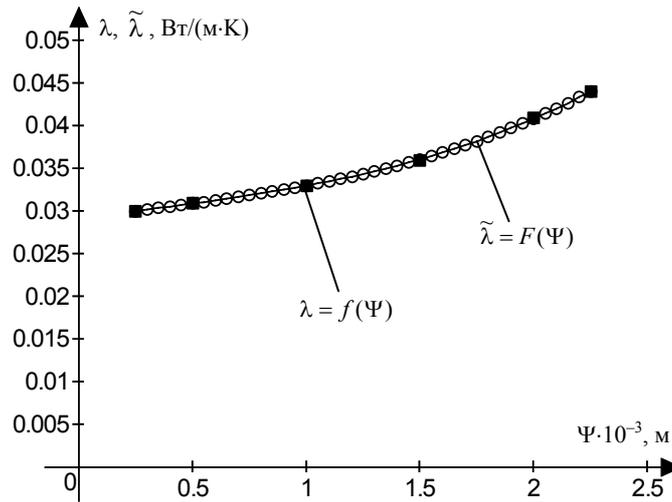


Рис. 3.25. Продолжение

з)



д)

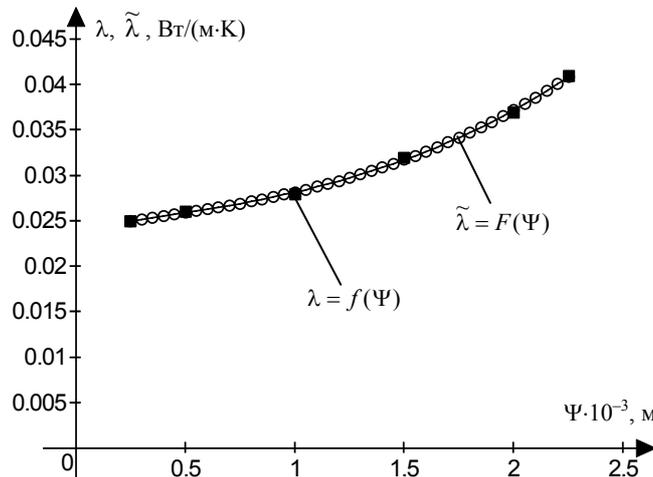


Рис. 3.25. Окончание

Воздействие температуры окружающей среды на ИИИС НК ТФСМ, исследование математических моделей теплофизических измерений в широком диапазоне температур и рекомендации по выбору модели для определения ТФСМ изложены в работах [74, 75].

При проведении теплофизического измерения осуществляется тепловое воздействие на исследуемый материал импульсами заданной частоты и мощности, при этом проводится параметрическая адаптация по мощности и частоте теплового воздействия на исследуемый материал в соответствии с классами и диапазонами исследуемых материалов. В результате измерения определяется теплопроводность исследуемых материалов, на основе которой по экспериментально полученным зависимостям и аппроксимирующим их функциям, определяют контактное термосопротивление, влажность и температуру в тепловой системе "термозонд – исследуемый материал".

На рис. 3.26 представлены графики зависимости теплопроводности исследуемых материалов от температуры  $\tilde{\lambda} = F(T)$ . Соответствующие им аппроксимирующие функции  $\lambda = F(T)$  для ПММ, линолеума, войлока, минваты и рипора, имеют следующий вид:

а) для ПММ

$$\tilde{\lambda} = F(T) = 3,35 \cdot 10^{-8} T^3 + 1,203 \cdot 10^{-6} T^2 + 2,28 \cdot 10^{-4} T + 0,19;$$

б) для войлока

$$\tilde{\lambda} = F(T) = -2,17 \cdot 10^{-8} T^3 - 2,30 \cdot 10^{-6} T^2 + 2,11 \cdot 10^{-4} T + 0,08;$$

в) для линолеума

$$\tilde{\lambda} = F(T) = -5,56 \cdot 10^{-9} T^3 + 2,91 \cdot 10^{-7} T^2 + 2,20 \cdot 10^{-4} T + 0,048;$$

г) для минваты

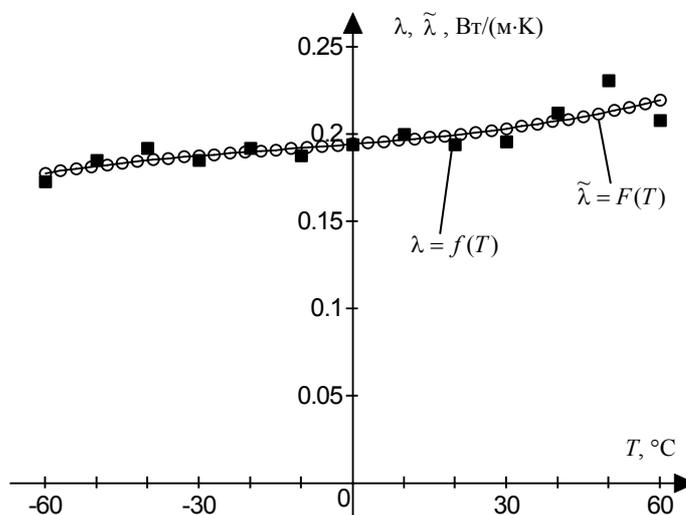
$$\tilde{\lambda} = F(T) = -3,310 \cdot 10^{-8} T^3 + 1,843 \cdot 10^{-7} T^2 + 2,64 \cdot 10^{-4} T + 0,039;$$

д) для рипора

$$\tilde{\lambda} = F(T) = 2,77 \cdot 10^{-8} T^3 + 7,59 \cdot 10^{-8} T^2 + 7,79 \cdot 10^{-6} T + 0,025.$$

При определении ТФСМ часто используют экспериментальные термограммы, полученные для поверхности исследуемого материала при допущении отсутствия контактного термосопротивления. В действительности же в плоскости контакта термозонда и исследуемого материала всегда присутствуют прослойки воздуха, влаги, следы смазок и т.д., которые обладают определенным термосопротивлением, создающим дополнительный перепад температур в контактирующих телах. Оценка погрешности определения ТФСМ, обусловленной контактным термосопротивлением, и метод расчета контактного термосопротивления изложены подробно в работах [7, 49, 76].

а)



б)

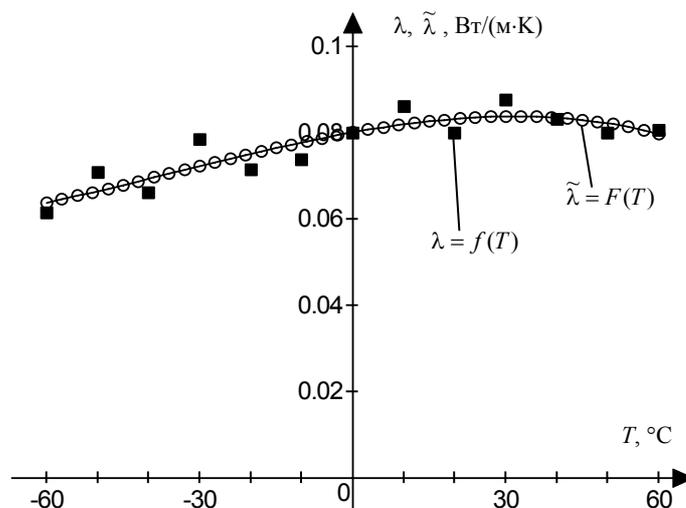
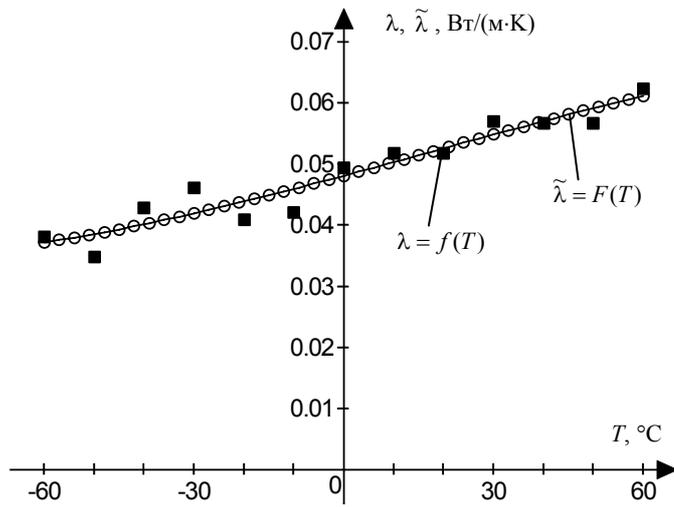


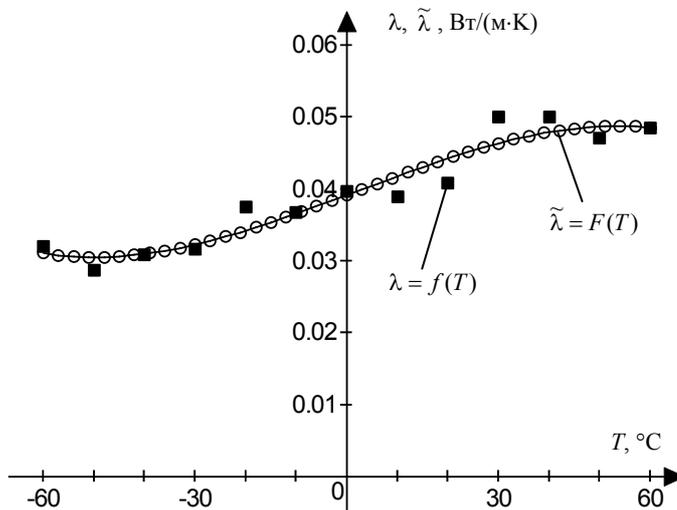
Рис. 3.26. Зависимости результатов измерения теплопроводности от температуры:

а – ПММ; б – войлока; в – линолеума; г – минваты; д – рипора

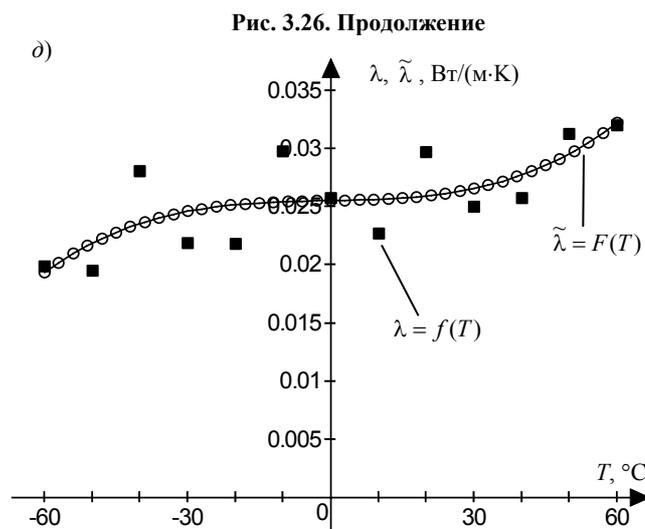
е)



а)



б)



**Рис. 3.26. Окончание**

Полученные зависимости теплопроводности исследуемых материалов от контактного термосопротивления приведены на рис. 3.27.

Соответствующие этим зависимостям аппроксимирующие функции  $\tilde{\lambda} = F(R_T)$  имеют следующий вид:

а) для ПММ

$$\tilde{\lambda} = F(R_T) = -0,10R_T^3 + 0,32R_T^2 - 0,41R_T + 0,28;$$

б) для линолеума

$$\tilde{\lambda} = F(R_T) = -0,11R_T^3 + 0,32R_T^2 - 0,34R_T + 0,18;$$

в) для винилискожи

$$\tilde{\lambda} = F(R_T) = -0,009R_T^3 + 0,089R_T^2 - 0,181R_T + 0,14;$$

г) для войлока

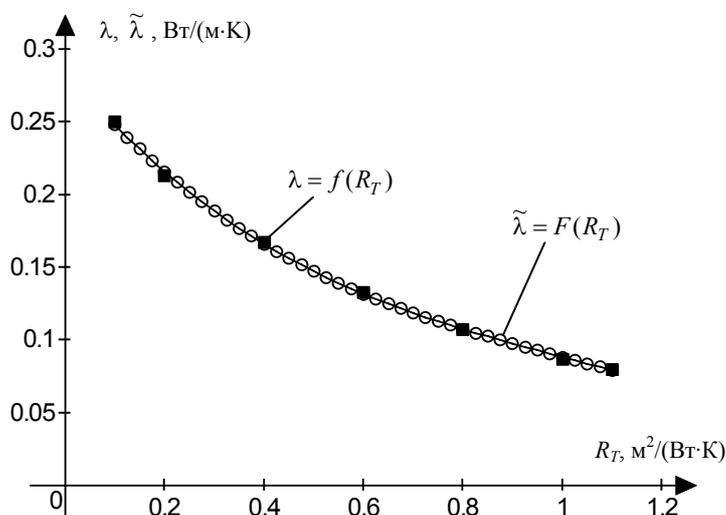
$$\tilde{\lambda} = F(R_T) = 0,061R_T^3 - 0,043R_T^2 - 0,094R_T + 0,093;$$

д) для рипора

$$\tilde{\lambda} = F(R_T) = 0,074R_T^3 - 0,093R_T^2 - 0,036R_T + 0,067.$$

Изменение влажности окружающей среды, исследуемых материалов и изделий приводит также к искажению истинных данных об их ТФС, следовательно, необходимо осуществлять контроль влажности исследуемых материалов и вводить коррекцию результатов определения ТФСМ. Контроль влажности изложен также в работе [26].

а)



б)

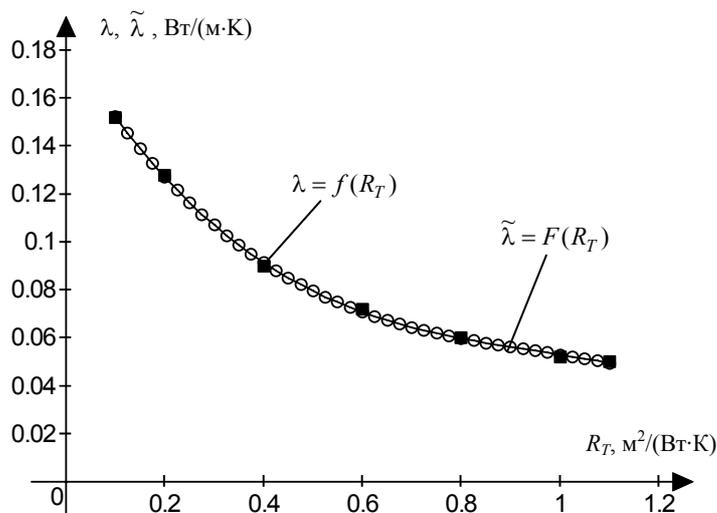
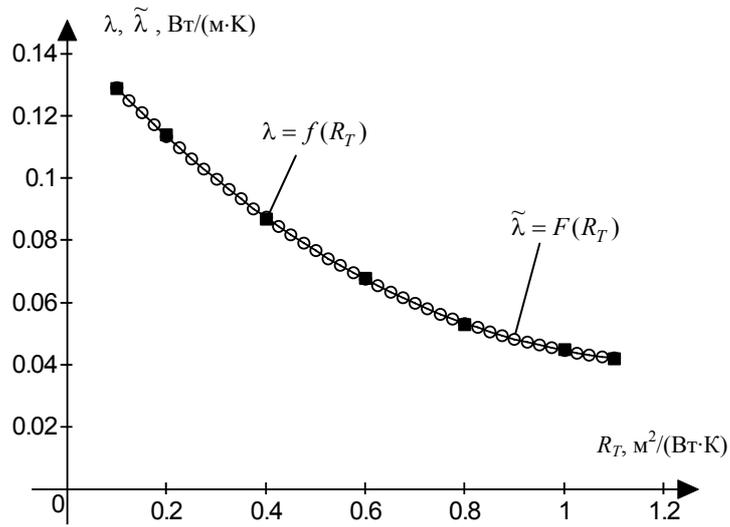


Рис. 3.27. Зависимости результатов измерения теплопроводности от контактного термосопротивления:

а – ПММ; б – линолеума; в – винилискожи; г – войлока; д – рипора

е)



е)

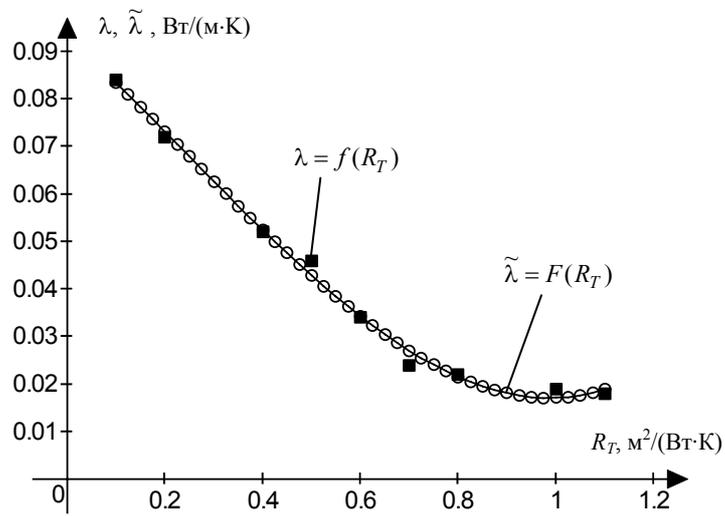


Рис. 3.27. Продолжение

д)

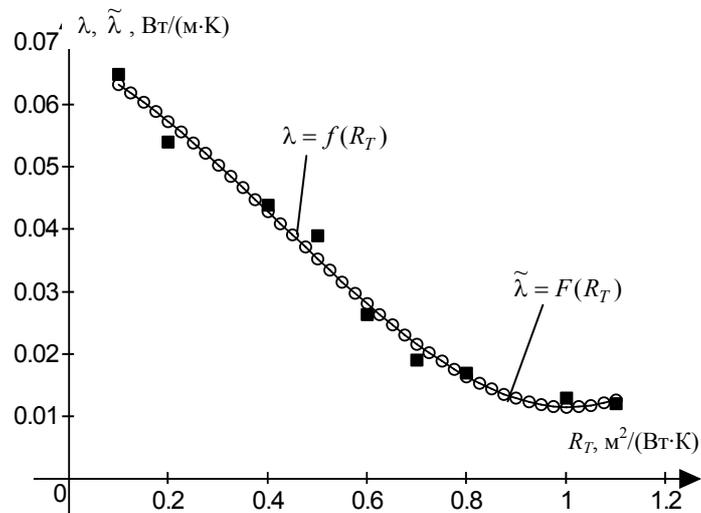


Рис. 3.27. Окончание

На рис. 3.28 представлены графики зависимости теплопроводности от влажности  $\lambda = f(W)$ . Соответствующие им аппроксимирующие функции  $\tilde{\lambda} = F(W)$  для рипора, войлока, минваты и дерева представлены в виде следующих выражений:

а) для дерева

$$\tilde{\lambda} = F(W) = -3,106 \cdot 10^{-6} W^3 + 1,31 \cdot 10^{-4} W^2 + 3,37 \cdot 10^{-4} W + 0,11 ;$$

б) для войлока

$$\tilde{\lambda} = F(W) = 3,08 \cdot 10^{-6} W^3 - 2,027 \cdot 10^{-4} W^2 + 0,0045 W + 0,08 ;$$

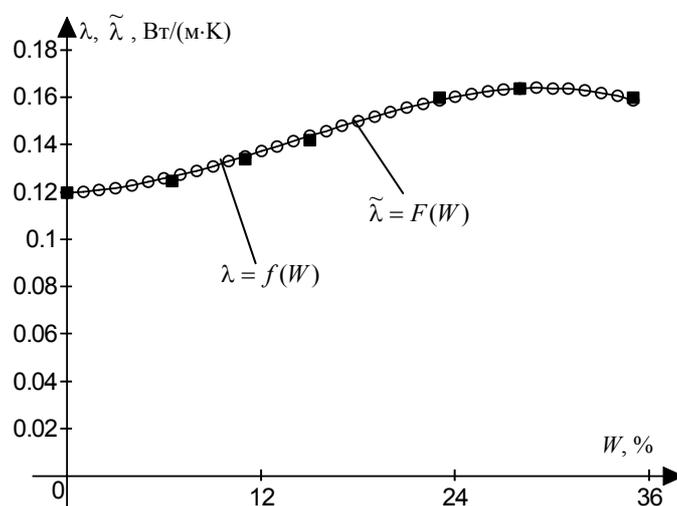
в) для минваты

$$\tilde{\lambda} = F(W) = 2,86 \cdot 10^{-7} W^3 - 4,27 \cdot 10^{-5} W^2 + 0,0019 W + 0,048 ;$$

г) для рипора

$$\tilde{\lambda} = F(W) = 3,42 \cdot 10^{-7} W^3 - 2,76 \cdot 10^{-5} W^2 + 7,80 \cdot 10^{-4} W + 0,027 .$$

а)



б)

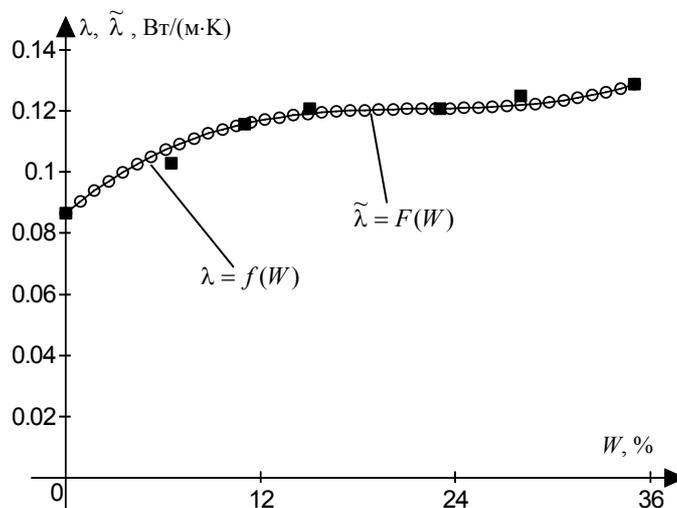


Рис. 3.28. Зависимости результатов измерения теплопроводности от влажности:

а – дерева; б – войлока; в – минваты; г – рипора

в)

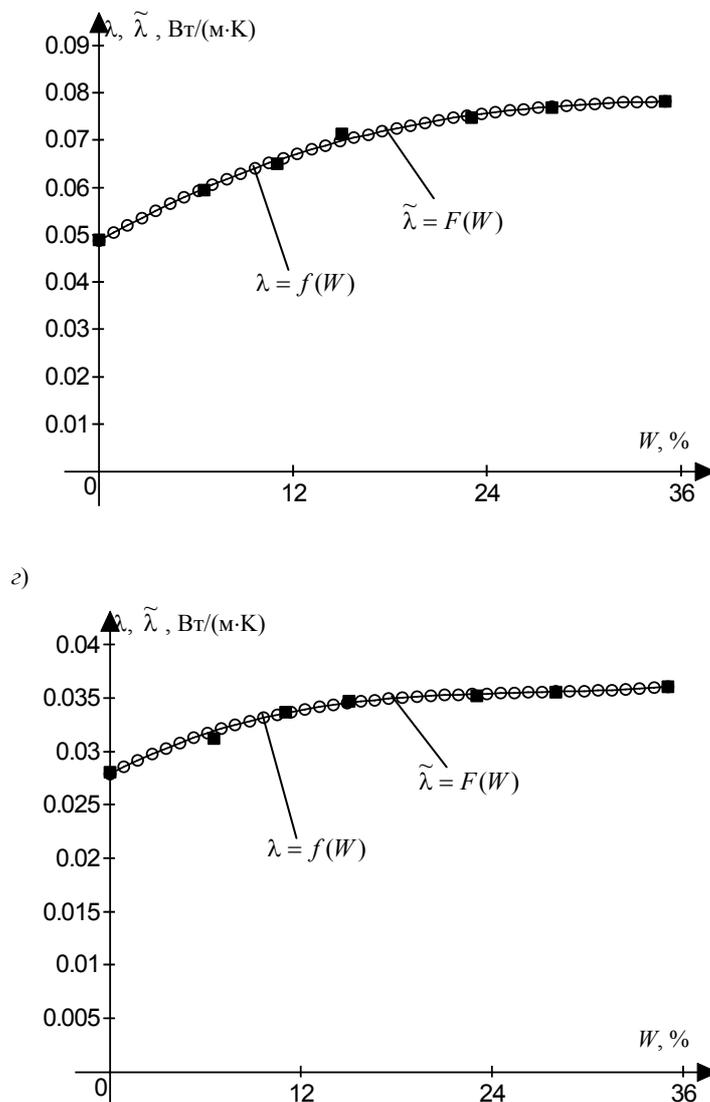


Рис. 3.28. Окончание

Полученная таким образом измерительная информация о шероховатости, влажности, температуре, контактном термосопротивлении заносится в процессе экспериментов в базу знаний ИИИС и далее используется для осуществления корректирующей стратегии, т.е. адаптивной коррекции результатов теплофизического измерения исследуемых объектов с помощью системы допускового контроля ИИИС, куда заносятся допустимые значения вышеперечисленных контролируемых параметров, установленные соответствующими ГОСТами для конкретных материалов и изделий из них и данные теплофизических экспериментов.

В процессе разработки ИИИС НК ТФСМ проведены совершенствования метода измерения ТФС и структурных блоков системы.

При определении ТФС полистирольных пенопластов и многослойных линолеумов решалась задача оперативного контроля и достижения требуемой точности измерения, так как исследования проводились для нескольких видов полистирольного пенопласта, отличающихся по теплопроводности на  $0,005 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$  и линолеумов, отличающихся по теплопроводности на  $0,01 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ .

Теплофизические измерения проводились с помощью ИИИС НК ТФСМ. Конструкция применяемого ИИЗ обеспечивает требуемую чувствительность для достижения достаточной точности определения параметров ТФС, а также оптимальное тепловое воздействие на полистирольный пенопласт с сохранением целостности его поверхности и на многослойный линолеум, обеспечивая прохождение теплового воздействия термозонда на всю толщину материала [77, 78].

Сложность в определении ТФС винилискож-НТ заключается в том, что исследуемые многослойные материалы отличаются теплопроводно-

стью каждого слоя от 0,05 до 0,35 Вт/(м·К). Следовательно, время достижения установившегося температурного поля материалов различно. Интеллектуальные процедуры в ИИИС при исследовании винилискож-НТ позволили определить оптимальный алгоритм измерения теплопроводности винилискож-НТ на разной основе [79].

Одним из главных направлений развития производства является повышение качества выпускаемой продукции. Важнейшим показателем качества минераловатных плит служит их теплопроводность. Созданная интеллектуальная информационно-измерительная система неразрушающего контроля решает задачи экспресс-контроля  $\lambda$  и разработки технологии производства минераловатных плит [59].

Предлагаемую ИИИС НК ТФСМ возможно использовать для определения ряда качественных показателей материалов: теплоусвоения; концентрации абсорбентов в материалах, толщины покрытия твердых материалов; получения металлополимеров с заданной теплопроводностью и других [40, 80], что позволяет применить ИИИС на промышленных предприятиях и научных лабораториях.

При разработке технологического процесса изготовления теплоизоляционных, полимерных, строительных и других материалов необходим контроль ТФСМ непосредственно в цехах предприятий. Для этой цели в разработанной ИИИС предусмотрен дистанционный контроль, при котором осуществляется оперативное определение ТФС и запись полученной информации в базу знаний ИИИС [81]. На основе анализа и обработки этой информации выполняется коррекция технологического процесса изготовления материалов, что способствует повышению качества выпускаемых материалов и снижает затраты на процесс их изготовления.

Для повышения точности определения коэффициента теплопроводности исследуемых материалов применяется комбинированный способ обработки цифровой измерительной информации, изложенный в работе [82]. Способ позволяет свести к минимуму результирующую погрешность определения  $\lambda$ . В качестве исходного принято соотношение, вытекающее из детерминированного закона Фурье для плотности теплового потока. Далее используется метод наименьших квадратов с целью учета влияния погрешностей термодатчиков на величину  $\lambda$ . Расчетные соотношения получены в аналитическом виде, в качестве аргумента в которых служат погрешности термодатчиков, расстояние их от источника тепла и экспериментальные значения температур поверхности исследуемого объекта.

В процессе теплофизических измерений погрешности измерений могут определяться не только воздействием большого числа внешних и внутренних факторов, но и упрощенной математической моделью теплового процесса, не учитывающей дестабилизирующие факторы. Внешние факторы, влияющие на результаты эксперимента, можно сконцентрировать в некотором количественном показателе, определяющем работоспособность измерительной системы и характеризующем достоверность результатов измерения. Таким показателем качественной работоспособности системы может быть функциональная надежность, которая используется для повышения достоверности результатов теплофизических измерений одним из методов, изложенным в работе [83]:

$$P_d = P_{ВФ} P_{ВР} ,$$

где  $P_d$  — вероятность достоверных измерений в условиях воздействия на ИИИС внешних дестабилизирующих факторов, не учтенных алгоритмом измерения;  $P_{ВФ}$  — вероятность факторов внешнего воздействия (ВФ), не учтенных алгоритмом измерения;  $P_{ВР}$  — вероятность работоспособности (ВР) ИИИС в условиях действия внешних факторов.

Коррекция результатов измерения при этом ведется с помощью показательной функции  $P_{ВФ}$ , которая в значительной степени отображает функцию распределения усредненных случайных воздействий на результаты теплофизического эксперимента.

Работоспособность ИИИС НК ТФСМ проверена при проведении теплофизических измерений на теплоизоляционных материалах с теплопроводностью в диапазоне 0,028...0,1 Вт/(м·К): рипоре, минвате полужесткой и повышенной жесткости, войлоке, различных пенопластах. Относительная погреш-

ность измерения при этом составляет 2...4 %. Кроме того, исследовались ТФС ряда строительных материалов: бетона, газосиликата, цемента и другие материалы с теплопроводностью 0,2...0,7 Вт/(м·К). Относительная погрешность указанных измерений составляет 3...5 %.

Разработанная ИИИС НК ТФСМ характеризуется гибкой структурой и многофункциональностью. Изменяя программным способом алгоритм функционирования, можно определить ряд качественных параметров материалов и изделий из них: параметры адсорбции, толщину покрытия изделий, концентрацию органических жидкостей в волокнистых материалах, содержание алюминия и графита в металлополимерах, ТФС металлополимеров и др.

Применение разработанной интеллектуальной информационно-измерительной системы позволяет определять теплофизические свойства материалов в широком диапазоне теплопроводности: строительных материалов, теплоизоляционных, металлополимеров и других, а также применять ИИИС для автоматизированного процесса разработки технологии производства твердых материалов с учетом влияния воздействующих ДФ на результат измерения ТФС материалов.

Таким образом, предлагаемая ИИИС [57] характеризуется большими преимуществами по сравнению с известными информационно-измерительными системами НК ТФСМ: универсальностью, возможностью получения достоверной информации о теплофизических свойствах материалов в результате применения новых оперативного, интеллектуального методов НК ТФСМ, повышающих производительность измерений, гибкой структуры ИИИС, структурно-параметрической адаптации по режимно-энергетическим параметрам, а также автоматической коррекции результатов измерения при воздействии дестабилизирующих факторов, что повышает метрологический уровень результатов НК ТФСМ в целом. ИИИС достигает высокой метрологической точности за счет мощного программного обеспечения с минимальными аппаратными затратами.

Применение методов искусственного интеллекта в ИИС позволяет повысить оперативность и точность НК ТФСМ в результате оптимизации параметров теплофизических измерений, выбора метода контроля ТФСМ на основе процедур классификации и распознавания образов в зависимости от измерительной ситуации, измерений с прогнозируемой погрешностью, расширить функциональные возможности ИИС за счет разработки постоянно пополняемой базы знаний и процедуры принятия решений в условиях неопределенности, синтеза алгоритма функционирования и структуры системы.

#### **4. МЕТРОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ НК ТФСМ**

---

---

Процессы измерения и контроля качества материалов и изделий из них являются исключительно важными в производстве. Только обеспечив высокое качество измерения и контроля с помощью ИИИС НК ТФСМ, можно достичь высокого качества конечной продукции.

Основным показателем, характеризующим качество результата измерения, является погрешность измерения. Количественное значение погрешности зависит от многих факторов, сопровождающих процесс измерения: характера измеряемой величины, несовершенства ИИИС, с помощью которой производится измерение, условий измерения и т.д. Многие из этих факторов, как правило, имеют случайный характер и поэтому их влияние на погрешность результата измерения не может быть полностью устранено.

Метрологический уровень измерения и контроля ТФСМ зависит от метрологических характеристик ИИИС, под которыми понимаются такие характеристики, которые позволяют судить о пригодности ИИИС для измерений в известном диапазоне с заданной точностью.

Формализованное описание измерительных процедур, результатов измерения, их характеристик, а также метрологических характеристик ИИИС необходимо для определения характеристик результатов измерений и метрологических характеристик ИИИС расчетными методами на аналитической основе [32, 84 – 86].

Главной целью формализованного описания измерительных процедур, погрешностей и характеристик погрешностей является формирование основы для оценки метрологического уровня результатов теплофизических измерений. Такая оценка проводится в данной главе для метрологической аттестации применяемого метода определения ТФСМ, а также аттестации разработанной интеллектуальной информационно-измерительной системы НК ТФСМ.

#### 4.1. ОЦЕНКА ПОГРЕШНОСТЕЙ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ НА ОСНОВЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ИССЛЕДУЕМОГО МАТЕРИАЛА И УРАВНЕНИЯ ИЗМЕРЕНИЙ

Математическая модель исследуемого материала и уравнения измерений должны содержать необходимую информацию, чтобы расчетным путем получить аналитические соотношения для оценки погрешностей результатов измерений.

Для обобщенного описания результатов измерения используются характеристики погрешностей. К основным характеристикам погрешности относятся:

- математическое ожидание (систематическая погрешность) [55]

$$\Delta_{\text{сист}} \lambda_j^* = M[\Delta \lambda_j^*] = M[\lambda_j^*] - \lambda(t_j); \quad (4.1)$$

- корень квадратный из дисперсии (средняя квадратическая погрешность)

$$\sigma_{\Delta} = D^{1/2}[\Delta \lambda_j^*] = \left[ \lim_{m \rightarrow \infty} \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m (\Delta \lambda_j^* - \Delta_{\text{сист}} \lambda_j^*)^2 \right]^{1/2}, \quad (4.2)$$

где  $m$  – число измерительных экспериментов;

- доверительный интервал

$$[\Delta_{\text{н}} \lambda_j^*, \Delta_{\text{в}} \lambda_j^*]$$

с установленными нижней и верхней границами;

- доверительная вероятность  $P_d$ , определяющая вероятность того, что

$$\Delta_{\text{н}} \lambda_j^* \leq \Delta \lambda_j^* \leq \Delta_{\text{в}} \lambda_j^*.$$

Рассмотрим характеристики погрешности результатов измерения коэффициентов тепло- и температуропроводности при частотно-импульсном тепловом воздействии на исследуемый материал.

Анализ характеристик погрешностей выполним на основе уравнения измерений тепло- и температуропроводности при частотно-импульсном тепловом воздействии на исследуемый материал [86, 87]:

$$a_i^* = \langle K_1 \langle \exp \langle K_2 \frac{\langle T_n^* \rangle_{q_{1i}}}{\langle T_m^* \rangle_{q_{2i}}} q_{3i} \rangle q_{4i} \rangle q_{5i} \rangle; \quad (4.3)$$

$$\lambda_i = \langle \frac{1}{\langle T_m^* \rangle_{q_{1i}}} \langle K_3 \langle \ln \langle (K_4 \langle a \rangle_{q_{2i}}) \rangle q_{3i} \rangle q_{4i} \rangle q_{5i} \rangle q_{6i} \rangle. \quad (4.4)$$

В уравнениях измерений (4.3), (4.4), которые являются процедурами косвенных измерений, применяются результаты прямых измерений температуры  $T(x, \tau)$ :

$$T_i^*(x, \tau) = \langle T^H \left( \langle \langle [bU(T_i(x, \tau))]_{\Delta_{KV}}^h \rangle q_{1i} \langle \langle m_T \rangle q_{2i} \rangle q_{3i} \rangle \right) \rangle q_{4i}. \quad (4.5)$$

Характеристики погрешности результатов измерений температуры получим на основе уравнения (4.5), определяющим структуру полной погрешности [32, 86, 87]:

$$\begin{aligned} \Delta T_i^* = & \Delta_b T_i^* + \Delta_U T_i^* + \Delta_{\text{кв}} T_i^* + \Delta_{01} T_i^* + \Delta_{02} T_i^* + \\ & + \Delta_{\Psi} T_i^* + \Delta_W T_i^* + \Delta_{\text{ОС}} T_i^* + \Delta_{R_T} T_i^*, \end{aligned} \quad (4.6)$$

где  $\Delta_b T_i^*$  – погрешность из-за отличия  $b$  от номинального значения  $b_H$ ;  $\Delta_U T_i^*$  – погрешность в результате отличия реальной статической характеристики преобразования термодатчика от номинальной, так как  $T^H(U) = U^{H^{-1}}(T)$  – градуировочная характеристика, отражающая преобразование, обратное номинальному преобразованию датчика, и, кроме того, эта составляющая включает в себя погрешность аппроксимации при реализации градуировочной характеристики на программной основе;  $\Delta_{\text{кв}} T_i^*$  – погрешность квантования;  $\Delta_{01} T_i^*$  – погрешность за счет округления результата аналого-цифрового преобразования при считывании;  $\Delta_{02} T_i^*$  – погрешность из-за округления конечного результата (результата обратного преобразования);  $\Delta_W T_i^*$  – погрешность из-за изменения влажности исследуемого материала;  $\Delta_\psi T_i^*$  – погрешность в результате влияния шероховатости поверхности ИМ;  $\Delta_{\text{OC}} T_i^*$  – погрешность из-за воздействия температуры окружающей среды на ИИИС и ИМ;  $\Delta_{R_T} T_i^*$  – погрешность в результате измерения контактного термосопротивления в области контакта ИИЗ и ИМ.

Для первой составляющей

$$\Delta_b T_i^* = \frac{\Delta b}{b_H} T_i, \quad (4.7)$$

где  $\Delta b = b - b_H$ .

Характеристики первой составляющей определяются следующим образом:

$$M[\Delta_b T_i^*] = \frac{\Delta b}{b_H} M[T_i]; \quad (4.8)$$

$$D^{1/2}[\Delta_b T_i^*] = \frac{\Delta b}{b_H} D^{1/2}[T_i]. \quad (4.9)$$

Вторая составляющая погрешности равна

$$\begin{aligned} \Delta_U T_i^* &= T^H \left[ \frac{bU(T_i)}{b_H} \right] - T^H \left[ \frac{bU^H(T_i)}{b_H} \right] = \\ &= T^H \left[ \frac{b}{b_H} (U^H(T_i) + \Delta U(T_i)) \right] - T^H \left[ \frac{b}{b_H} U^H(T_i) \right], \end{aligned} \quad (4.10)$$

где  $\Delta U(T_i) = U(T_i) - U^H(T_i)$ .

Когда градуировочная характеристика линейна

$$\Delta_U T_i^* = T^H \left[ \frac{b}{b_H} \Delta U(T_i) \right], \quad (4.11)$$

а для нелинейной градуировочной характеристики

$$\Delta_U T_i^* = \Delta T^H \left[ \frac{b}{b_H} U(T_i), \frac{b}{b_H} \Delta U(T_i) \right], \quad (4.12)$$

для линейной градуировочной характеристики

$$U(T_i) = a_1 T_i + a_2; \quad U^H(T_i) = a_1^H T_i + a_2^H; \quad T^H(U_i) = \frac{U_i - a_2^H}{a_1^H},$$

где  $a_1^H$  и  $a_2^H$  – номинальные значения параметров статической характеристики преобразования датчика,

$$\Delta_U T_i^* = \frac{1}{a_1^H} \left[ \frac{b}{b_H} \left( (a_1 - a_1^H) T_i + a_2 + a_2^H \right) - a_2^H \right]. \quad (4.13)$$

Тогда

$$M[\Delta_U T_i^*] = \frac{b(a_1 - a_1^H)}{a_1^H b_H} M[T_i] + \frac{b(a_2 - a_2^H)}{a_1^H b_H} - \frac{a_2^H}{a_1^H};$$

$$D^{1/2}[\Delta_U T_i^*] = \frac{b(a_1 - a_1^H)}{a_1^H b_H} D^{1/2}[T_i].$$

Погрешность квантования равна

$$\Delta_{\text{кв}} T_i^* = T^H \left[ \frac{b}{b_H} U(T_i) \right] + \Delta_{\text{кв}} \left[ \frac{b}{b_H} U(T_i) \right]^* - T^H \left[ \frac{b}{b_H} U(T_i) \right],$$

где  $\Delta_{\text{кв}} \left[ \frac{b}{b_H} U(T_i) \right]$  – погрешность квантования результата аналого-цифрового преобразования.

Когда градуировочная характеристика линейна

$$\Delta_K T_i^* = T^H \left[ \Delta_K \left[ \frac{b}{b_H} U(T_i) \right]^* \right];$$

$$\Delta_K T_i^* \in \left[ -\frac{\Delta_K T}{2}, \frac{\Delta_K T}{2} \right],$$

где  $\Delta_K T = \frac{T_{\text{max}} - T_{\text{min}}}{2^q}$  – интервал квантования температуры,

$$M[\Delta_K T_i^*] = 0, \quad D^{1/2}[\Delta_K T_i^*] = \frac{\Delta_K T}{2\sqrt{3}}. \quad (4.14)$$

Когда градуировочная характеристика нелинейна,

$$\Delta_K T_i^* = \Delta T^H \left[ \frac{b}{b_H} U(T_i), \Delta_K \left[ \frac{b}{b_H} U(T_i) \right]^* \right].$$

При этом квантование температуры будет неравномерным и характеристики  $M[\Delta_K T_i^*]$  и  $D^{1/2}[\Delta_K T_i^*]$  устанавливаются при заданных  $\omega(T_i)$  и  $T^H(U)$ .

Составляющая погрешности за счет округления результата аналого-цифрового преобразования равна

$$\Delta_{01} T_i^* = \Delta T^H \left[ \left[ \frac{b}{b_H} U(T_i) \right]^* + n\Delta_K U \right] - T^H \left[ \frac{b}{b_H} U(T_i) \right]^*, \quad (4.15)$$

где  $\left[ \frac{b}{b_H} U(T_i) \right]^*$  – результат аналого-цифрового преобразования без учета округления;  $n\Delta_K U$  – погрешность округления результата аналого-цифрового преобразования.

Если градуировочная характеристика линейна

$$\Delta_{01} T_i^* = \Delta T^H (n\Delta_K U) = n\Delta_K U, \quad M[\Delta_{01} T_i^*] = \frac{\Delta_K T}{2},$$

$$D^{1/2}[\Delta_{01} T_i^*] = \frac{\Delta_K T 2^{q_1 - 1}}{\sqrt{3}}.$$

Если градуировочная характеристика нелинейна

$$\Delta_{01} T_i^* = \Delta T^H \left[ \left[ \frac{b}{b_H} U(T_i) \right]^* + n\Delta_K U \right]$$

и характеристики  $M[\Delta_{01} T_i^*]$  и  $D^{1/2}[\Delta_{01} T_i^*]$  определяются для конкретных  $\omega(T_i)$  и  $T^H(U)$ .

Составляющая погрешность при округлении конечного результата равна

$$\Delta_{02}T_i^* = r\Delta_0, \quad (4.16)$$

где  $\Delta_0$  – цена младшего округленного разряда, определяемая видом градуировочной характеристики.

При этом

$$M[\Delta_{02}T_i^*] = \sum_{q_2=1}^{q_2^{\max}} P(q_2) \frac{\Delta_0}{2};$$

$$D^{1/2}[\Delta_{02}T_i^*] = \sum_{q_2=1}^{q_2^{\max}} P(q_2) \left[ \sum_{r=-(2^{q_2-1}-1)}^{2^{q_2-1}-1} \left[ r\Delta_0 - \frac{\Delta_0}{2} \right]^2 \frac{1}{2^{q_2}} \right].$$

Погрешность из-за изменения влажности исследуемого материала

$$\Delta_W T_i^* = \frac{\Delta W_i}{W_{н.у}} T_i, \quad (4.17)$$

где  $\Delta W_i = W_i - W_{н.у}$ ,  $W_{н.у}$  – влажность при нормальных условиях теплофизических измерений.

При этом

$$M[\Delta_W T_i^*] = \frac{\Delta W_i}{W_{н.у}} M[T_i];$$

$$D^{1/2}[\Delta_W T_i^*] = \frac{\Delta W_i}{W_{н.у}} D^{1/2}[T_i].$$

Составляющая погрешности в результате влияния шероховатости поверхности исследуемого материала

$$\Delta_\Psi T_i^* = \frac{\Delta \Psi_i}{\Psi_H} T_i, \quad (4.18)$$

где  $\Delta \Psi_i = \Psi_i - \Psi_H$ ,  $\Psi_H$  – номинальное значение шероховатости исследуемого материала.

Характеристики данной погрешности

$$M[\Delta_\Psi T_i^*] = \frac{\Delta \Psi_i}{\Psi_H} M[T_i];$$

$$D^{1/2}[\Delta_\Psi T_i^*] = \frac{\Delta \Psi_i}{\Psi_H} D^{1/2}[T_i].$$

Погрешность за счет воздействия температуры окружающей среды на ИИИС и исследуемый материал

$$\Delta_{OC} T_i^* = \frac{\Delta T_{OC}}{T_{н.у}} T_i, \quad (4.19)$$

где  $\Delta T_{OC} = T_{OC} - T_{н.у}$ ,  $T_{н.у}$  – температура при нормальных условиях теплофизических измерений.

При этом

$$M[\Delta_{OC} T_i^*] = \frac{\Delta T_{OC}}{T_{н.у}} M[T_i];$$

$$D^{1/2}[\Delta_{OC} T_i^*] = \frac{\Delta T_{OC}}{T_{н.у}} D^{1/2}[T_i].$$

Погрешность из-за изменения контактного термосопротивления в области измерения

$$\Delta_{RT} T_i^* = \frac{\Delta R_T}{R_{T_H}} T_i, \quad (4.20)$$

где  $\Delta R_T = R_T - R_{T_H}$ ,  $R_{T_H}$  – номинальное значение контактного термосопротивления для исследуемого материала с известной теплопроводностью.

Характеристики составляющей данной погрешности

$$M[\Delta_{R_T} T_i^*] = \frac{\Delta R_T}{R_{T_H}} M[T_i];$$

$$D^{1/2}[\Delta_{R_T} T_i^*] = \frac{\Delta R_T}{R_{T_H}} D^{1/2}[T_i].$$

Выполним анализ характеристик погрешности результатов измерений коэффициентов тепло- и температуропроводности [86, 87].

Структура полной погрешности результатов измерения температуропроводности в соответствии с уравнением измерения (4.16) имеет следующий вид

$$\Delta a_i^* = \Delta_{K_1} a_i^* + \Delta_{K_2} a_i^* + \Delta T_n a_i^* + \Delta T_m a_i^* + \sum_{i=1}^5 \Delta_{0i} a_i^*, \quad (4.21)$$

где  $\Delta_{K_1} a_i^*$  – погрешность в результате неточного определения  $K_1$ ;  $\Delta_{K_2} a_i^*$  – погрешность в результате неточного определения  $K_2$ ;  $\Delta T_n a_i^*$  – погрешность, обусловленная неточным определением  $T_n$ ;  $\Delta_{0i} a_i^*$  – погрешности округления.

Первая составляющая полной погрешности равна

$$\begin{aligned} \Delta_{K_1} a_i^* &= (K_1 + \Delta K_1) \exp\left(K_2 \frac{T_n}{T_m}\right) - K_1 \exp\left(K_2 \frac{T_n}{T_m}\right) = \\ &= [(K_1 + \Delta K_1) - K_1] \left[ \exp\left(K_2 \frac{T_n}{T_m}\right) \right] = \Delta K_1 \exp\left(K_2 \frac{T_n}{T_m}\right), \end{aligned} \quad (4.22)$$

где  $K_1$  – точное значение,  $K_1^* = (K_1 + \Delta K_1)$  – неточное значение  $K_1$ .

Вторая составляющая погрешности  $\Delta_{K_2} a_i^*$  определяется аналогично

$$\begin{aligned} \Delta_{K_2} a_i^* &= K_1 \exp\left[(K_2 + \Delta K_2) \frac{T_n}{T_m}\right] - K_1 \exp\left(K_2 \frac{T_n}{T_m}\right) = \\ &= K_1 \exp\left(K_2 \frac{T_n}{T_m}\right) + K_1 \exp\left(\Delta K_2 \frac{T_n}{T_m}\right) - K_1 \exp\left(K_2 \frac{T_n}{T_m}\right) = \\ &= K_1 \exp\left(\Delta K_2 \frac{T_n}{T_m}\right), \end{aligned} \quad (4.23)$$

где  $K_2$  – точное значение,  $K_2^* = (K_2 + \Delta K_2)$  – неточное значение  $K_2$ .

Погрешность, обусловленная неточным определением  $T_n$ ,

$$\Delta T_n a_i^* = K_1 \left[ \exp\left(K_2 \frac{T_n + \Delta T_n^*}{T_m}\right) - \exp\left(K_2 \frac{T_n}{T_m}\right) \right]. \quad (4.24)$$

Погрешность в результате неточности определения  $T_m$

$$\Delta T_m a_i^* = K_1 \left[ \exp\left(K_2 \frac{T_n}{T_m + \Delta T_m}\right) - \exp\left(K_2 \frac{T_n}{T_m}\right) \right]. \quad (4.25)$$

Погрешность за счет округления  $K_1$  определяется следующим образом:

$$\Delta_{01} a_i^* = -\Delta_0 K_1^* \exp\left(K_2 \frac{T_n}{T_m}\right), \quad (4.26)$$

где  $\Delta_0 K_1^*$  – погрешность округления  $K_1^*$ .

Погрешность из-за округления  $K_2$  определяется по формуле

$$\Delta_{02} a_i^* = -K_1 \exp\left(\Delta_0 K_2^* \frac{T_n}{T_m}\right), \quad (4.27)$$

где  $\Delta_0 K_2^*$  – погрешность округления  $K_2^*$ .

Погрешность, обусловленная округлением  $\exp\left(K_2 \frac{T_n}{T_m}\right)$ , равна

$$\Delta_{03} a_i^* = \langle K_1^* \rangle \left[ \exp\left(K_2 \frac{T_n}{T_m}\right) \frac{\Delta_0 \left( \exp\left(K_2 \frac{T_n}{T_m}\right) \right)}{\exp\left(K_2 \frac{T_n}{T_m}\right) + \Delta_0 \left( \exp\left(K_2 \frac{T_n}{T_m}\right) \right)} \right], \quad (4.28)$$

где  $\Delta_0 \left( \exp\left(K_2 \frac{T_n}{T_m}\right) \right)$  – погрешность округления  $\exp\left(K_2 \frac{T_n}{T_m}\right)$ .

Составляющая погрешности, обусловленная округлением произведения  $K_1 \exp\left(K_2 \frac{T_n}{T_m}\right)$ , равна

$$\begin{aligned} \Delta_{04} a_i^* = & \langle K_1^* \rangle_{q_1} \langle \exp\left(K_2 \frac{T_n}{T_m}\right) \rangle_{q_2} \times \\ & \times \frac{-\Delta_0 \left( K_1 \langle \exp\left(K_2 \frac{T_n}{T_m}\right) \rangle_{q_3} \right)}{K_1 \langle \exp\left(K_2 \frac{T_n}{T_m}\right) \rangle_{q_3} + \Delta_0 \left( K_1 \langle \exp\left(K_2 \frac{T_n}{T_m}\right) \rangle_{q_3} \right)}, \end{aligned} \quad (4.29)$$

где  $\Delta_0 \left( K_1 \langle \exp\left(K_2 \frac{T_n}{T_m}\right) \rangle_{q_3} \right)$  – погрешность округления  $K_1 \exp\left(K_2 \frac{T_n}{T_m}\right)$ .

Последняя компонента полной погрешности

$$\Delta_{05} a_i^* = \Delta_0 \left[ \langle K_1^* \rangle_{q_1} \langle \exp\left(\langle K_2 \rangle_{q_2} \frac{T_n}{T_m}\right) \rangle_{q_3} \right]. \quad (4.30)$$

Определим далее характеристики погрешности результатов измерений теплопроводности  $\lambda$  ИМ.

На основе уравнения (4.17) структура полной погрешности результата измерения  $\lambda$  будет следующей:

$$\Delta \lambda_i^* = \Delta_{K_3} \lambda_i^* + \Delta_{K_4} \lambda_i^* + \Delta_a \lambda_i^* + \Delta_{T_m} \lambda_i^* + \sum_{i=1}^5 \Delta_{0i} \lambda_i^*, \quad (4.31)$$

где  $\Delta_{K_3} \lambda_i^*$  – погрешность, обусловленная неточным определением значения  $K_3$ ;  $\Delta_{K_4} \lambda_i^*$  – погрешность, обусловленная неточным определением значения  $K_4$ ;  $\Delta_a \lambda_i^*$  – погрешность из-за неточного установления  $a$ ;  $\Delta_{T_m} \lambda_i^*$  – погрешность в результате неверного установления значения  $T_m$ ;  $\Delta_{0i} \lambda_i^*$  – погрешности из-за округлений.

Первая составляющая полной погрешности равна

$$\Delta_{K_3} \lambda_i^* = \frac{1}{T_m} (K_3 + \Delta K_3) \ln(K_4 a) - \frac{1}{T_m} K_3 \ln(K_4 a) = \frac{1}{T_m} \Delta K_3 \ln(K_4 a), \quad (4.32)$$

где  $K_3$  – точное значение,  $K_3^* = (K_3 + \Delta K_3)$  – неточное значение  $K_3$ .

Вторая составляющая полной погрешности равна

$$\Delta_{K_4} \lambda_i^* = \frac{1}{T_m} K_3 \ln[(K_4 + \Delta K_4) a] - \frac{1}{T_m} K_3 \ln(K_4 a). \quad (4.33)$$

где  $K_4$  – точное значение;  $K_4^* = (K_4 + \Delta K_4)$  – неточное значение  $K_4$ .

Погрешность из-за неточного определения температуропроводности  $a$

$$\Delta_a \lambda_i^* = \frac{1}{T_m} K_3 \ln[K_4(a + \Delta a)] - \frac{1}{T_m} K_3 \ln(K_4 a). \quad (4.34)$$

Погрешность, обусловленная неверным установлением  $T_m$ ,

$$\begin{aligned} \Delta T_m \lambda_i^* &= \frac{1}{T_m + \Delta T_m^*} K_3 \ln(K_4 a) - \frac{1}{T_m} K_3 \ln(K_4 a) = \\ &= K_3 \ln(K_4 a) \left( -\frac{\Delta T_m^*}{T_m(T_m + \Delta T_m^*)} \right). \end{aligned} \quad (4.35)$$

Погрешности из-за округлений  $K_3$  определяются следующим образом:

$$\Delta_{01} \lambda_i^* = -\frac{1}{T_m} \Delta_0 K_3^* \ln(K_4 a), \quad (4.36)$$

где  $\Delta_0 K_3^*$  – погрешность округления  $K_3^*$ .

Погрешность в результате округления  $K_4$  определяется по формуле

$$\Delta_{02} \lambda_i^* = -\frac{1}{T_m} K_3 \ln(\Delta_0 K_4^*), \quad (4.37)$$

где  $\Delta_0 K_4^*$  – погрешность округления  $K_4^*$ .

Погрешность, обусловленная округлением  $\ln(K_4 a)$ , равна

$$\Delta_{03} \lambda_i^* = \frac{1}{T_m} \langle K_3^* \rangle_{q_1} \left[ -\frac{\Delta_0 [\ln(K_4 a)]}{\ln(K_4 a) [\ln(K_4 a) + \Delta_0 \ln(K_4 a)]} \right], \quad (4.38)$$

где  $\Delta_0 [\ln(K_4 a)]$  – погрешность округления  $\ln(K_4 a)$ .

Составляющая погрешности из-за округления произведения  $K_3 \ln(K_4 a)$  равна

$$\Delta_{04} \lambda_i^* = \frac{1}{T_m} \langle K_3^* \rangle_{q_1} \langle \ln(K_4 a) \rangle_{q_2} \frac{-\Delta_0 K_3 \langle \ln(K_4 a) \rangle_{q_3}}{K_3 \langle \ln(K_4 a) \rangle_{q_3} + \Delta_0 [K_3 \langle \ln(K_4 a) \rangle_{q_3}]}, \quad (4.39)$$

где  $\Delta_0 K_3 \langle \ln(K_4 a) \rangle_{q_3}$  – погрешность округления  $K_3 \langle \ln(K_4 a) \rangle_{q_3}$ .

Последняя компонента полной погрешности равна

$$\Delta_{05} \lambda_i^* = \Delta_0 \left[ \frac{1}{T_m} \langle K_3^* \rangle_{q_1} \langle \ln(\langle K_4^* \rangle_{q_2} a) \rangle_{q_3} \right]. \quad (4.40)$$

В вышеприведенных выражениях  $\Delta(\cdot)$  – погрешность определения  $(\cdot)$ , а  $\Delta_0(\cdot)$  – погрешность округления  $(\cdot)$ . Эти выражения составляют основу для определения математического ожидания и среднеквадратического отклонения компонент, которые определяются с учетом задаваемых исходных данных в виде распределения вероятности  $\omega(T_{li}^*)$  и  $\omega(a_{li}^*)$ .

#### 4.2. ВЫДЕЛЕНИЕ ДОМИНИРУЮЩИХ КОМПОНЕНТ В СОСТАВЕ ПОЛНЫХ ПОГРЕШНОСТЕЙ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕПЛО- И ТЕМПЕРАТУРОПРОВОДНОСТИ

Вклад каждой компоненты для вероятностной характеристики случайной величины  $\Delta U_i^*$  определяется как разность [32, 86, 87]:

$$\Delta\theta_i[\Delta U_j^*] = \theta_i[\Delta U_j^*] - \theta_{i-1}[\Delta U_j^*],$$

где  $\Delta\theta_i[\Delta U_j^*] = \theta_i \left[ \sum_{S=1}^i \Delta_S U_j^* \right]$ , причем  $\theta_0[\Delta U_j^*] = 0$ ,  $\theta_m[\Delta U_j^*] = \theta[\Delta U_j^*]$ .

Для систематической погрешности вклад каждой компоненты в характеристику полной погрешности определяется математическими ожиданиями компонент, так как при

$$\Delta U_j^* = \sum_{i=1}^m \Delta_i U_j^* \quad M[\Delta U_j^*] = \sum_{i=1}^m M[\Delta_i U_j^*].$$

Процедура выделения доминант заключается в следующем. После определения значений всех  $\Delta\theta_i[\Delta U_i^*]$  производится их упорядочивание, затем из рассмотрения исключаются все компоненты с малыми значениями  $\Delta\theta_i$ , суммарный вклад которых в  $\theta_i[\Delta U_i^*]$  меньше установленного.

Для примера рассмотрим сумму двух компонент полной погрешности результата измерений температуры  $\Delta_b T_i^*$  и  $\Delta_U T_i^*$ .

В соответствии с (4.7) и (4.13)

$$\Delta_b T_i^* + \Delta_U T_i^* = \frac{\Delta b}{b^H} T_i + \frac{1}{a_1^H} \left[ \frac{b}{b^H} \left( (a_1 - a_1^H) T_i + a_2 - a_2^H \right) - a_2^H \right];$$

$$D^{1/2}[\Delta_b T_i^* + \Delta_U T_i^*] = \left[ \frac{\Delta b}{b^H} + \frac{b}{a_1^H b^H} (a_1 - a_1^H) \right] D^{1/2}[T_i] = D_2^{1/2}[\Delta T_i^*].$$

На основе соотношения (4.9)

$$D_1^{1/2}[\Delta T_i^*] = D^{1/2}[\Delta_b T_i^*] = \frac{\Delta b}{b^H} D^{1/2}[T_i]$$

вклад  $\Delta_U T_i^*$  в полное среднеквадратическое отклонение погрешности равен

$$D_2^{1/2}[\Delta T_i^*] = \frac{b}{a_1^H b^H} (a_1 - a_1^H) D^{1/2}[T_i],$$

т.е. значению среднеквадратического отклонения  $\Delta_U T_i^*$ .

Если не учитывать когерентности  $\Delta_b T_i^*$  и  $\Delta_U T_i^*$ , получим

$$\begin{aligned} D_2^{1/2}[\Delta T_i^*] &= \left[ D[\Delta_b T_i^*] + D[\Delta_U T_i^*] \right]^{1/2} - D^{1/2}[\Delta_b T_i^*] = \\ &= \left[ \frac{\Delta^2 b}{(b^H)^2} + \frac{b^2}{(a_1^H)^2 (b^H)^2} (a_1 - a_1^H)^2 - \frac{\Delta b}{b^H} \right] D^{1/2}[T_i]. \end{aligned}$$

При соизмеримости  $D[\Delta_b T_i^*]$  и  $D[\Delta_U T_i^*]$

$$\Delta D_2^{1/2}[\Delta T_i^*] = D^{1/2}[\Delta_U T_i^*],$$

а значение, получаемое без учета когерентности, –

$$\Delta D_2^{1/2}[\Delta T_i^*] = 0,4 D^{1/2}[\Delta_U T_i^*],$$

то есть оценка вклада занижается в 2,5 раза.

Если в рассмотренном примере

$$D_2^{1/2}[\Delta_U T_i^*] < D^{1/2}[\Delta_b T_i^*]$$

и компонента с меньшим вкладом исключается из рассмотрения при

$$D_2^{1/2}[\Delta_U T_i^*] \leq 0,1 D^{1/2}[\Delta_b T_i^*],$$

условие пренебрежимо малого значения  $\Delta_U T_i^*$  относительно  $\Delta_b T_i^*$  определяется неравенством

$$\frac{b}{\Delta b a_1^H} (a_1 - a_{1H}) \leq 0,1.$$

При выделении доминирующих компонент в структуре полной погрешности измерений температуры исключены погрешности  $\Delta_b T_i^*$ ,  $\Delta_u T_i^*$ ,  $\Delta_{кв} T_i^*$ ,  $\Delta_{01} T_i^*$ ,  $\Delta_{02} T_i^*$ , суммарный вклад которых в  $\theta_i [\Delta U_j^*]$  меньше установленного. В итоге доминирующими компонентами, определяющими погрешность измерения температуры, значения которой используются при определении коэффициентов тепло- и температуропроводности, являются погрешность из-за влияния контактного термосопротивления, шероховатости поверхности исследуемых материалов, температуры и влажности окружающей среды.

Таким образом, предлагаемый подход обеспечивает корректность выделения доминант в совокупности компонент полной погрешности.

## **5. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ**

Обеспечение высокой точности теплофизических измерений, которые проводятся измерительно-вычислительной системой, и ее оценка является сложной задачей, решение которой позволяет осуществлять измерения с заданной точностью. Оценить погрешности и характеристики погрешностей результатов измерений можно с помощью метрологического эксперимента [1]. Для осуществления метрологического эксперимента проведены теплофизические измерения на эталонных образцах – ПММ и рипоре. Эталонные образцы из этих материалов аттестованы в НПО им. Д.И. Менделеева и рекомендованы в качестве стандартных эталонных образцов с допуском  $\pm(2...3) \%$  для поверки приборов и информационно-измерительных систем измерений ТФСМ.

Экспериментальные исследования разработанной ИИИС НК ТФСМ выполнены также при определении ТФС теплоизоляционных, строительных, полимерных материалов, искусственных кож на различной основе, линолеумов и других материалов.

Результатом разработки ИИИС является уменьшение составляющих общей погрешности измерения при проведении метрологического эксперимента, исследовании ТФС материалов и изделий и метрологической оценки результатов теплофизического измерения.

### **5.1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТФС МАТЕРИАЛОВ И ИЗДЕЛИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИИИС НК ТФСМ**

В методе оценки погрешности с помощью метрологического эксперимента в качестве истинного значения характеристики  $\theta$  принимаем следующее [32, 88, 89]:

$$\theta^* [\Delta \lambda_i^*] = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N U g^r [\Delta_a \lambda_i^*],$$

где  $\Delta_a \lambda_i^* = \lambda_{ia}^* - \lambda_i$  – оценка погрешности, получаемая с помощью гипотетического метрологического эксперимента при использовании адекватных моделей объектов, условий и средств измерений.

Ошибка оценки  $\theta^* [\Delta \lambda_i^*]$ , полученной с помощью метрологического эксперимента, представляется в виде суммы четырех компонент:

$$\Delta \theta^* [\Delta \lambda_i^*] = \Delta_{на} \theta^* [\Delta \lambda_i^*] + \Delta_{кв} \theta^* [\Delta \lambda_i^*] + \Delta_{H} \theta^* [\Delta \lambda_i^*] + \Delta_{g} \theta^* [\Delta \lambda_i^*],$$

где  $\Delta_{Ha}\theta^*[\Delta\lambda_i^*] = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N U g^r[\Delta^* \lambda_i^*] - \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N U g^r[\Delta_a^* \lambda_i^*]$  – ошибка, обусловленная неадекватностью используемых моделей  $\Delta^* \lambda_i^* = \lambda_i^* - \lambda_i$ ;

$\Delta_{Kb}\theta^*[\Delta\lambda_i^*] = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N U g^r[\Delta_a^* \lambda_i^*] - \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N U g^r[\Delta \lambda_i^*]$  – ошибка в результате конечности объема выборки;

$\Delta_g\theta^*[\Delta\lambda_i^*] = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N U g^r[\Delta^* \lambda_i^*] - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N U g^r[\Delta^* \lambda_i^*]$  – ошибка, обусловленная отличием  $\lambda_{gi}$  от  $\lambda_i$ ;

$\Delta_{HUIP}\theta^*[\Delta\lambda_i^*] = \langle \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N U g^r[\Delta_3^* \lambda_i^*] \rangle_{q_i} - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N U g^r[\Delta_3^* \lambda_i^*]$  – ошибка из-за неидеальности усреднения и исходного преобразования (НУИП).

Ошибка оценивания  $\theta[\Delta\lambda_i^*]$  с помощью метрологического эксперимента из-за неадекватности моделей, конечности объема выборки и неидеальности усреднения и исходного преобразования при одинаковых условиях (характере адекватных и неадекватных моделей, объеме выборки и виде неидеальности выполняемых преобразований) совпадают с ошибками оценок, получаемых с помощью имитационного моделирования.

Ошибки из-за отличия  $\lambda_{gi}$  от  $\lambda_i$  специфичны. Например,

$$\Delta_g M^*[\Delta\lambda_i^*] = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [\Delta_g \lambda_i^*],$$

где  $\Delta_g^* \lambda_i^* = \lambda_i - \lambda_{gi}$ ;

$$\Delta_g D^{1/2*}[\Delta\lambda_i^*] = \left[ \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N \left( \Delta_3^* \lambda_i^* - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \Delta_3^* \lambda_i^* \right)^2 \right]^{1/2} - \left[ \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N \left( \Delta^* \lambda_i^* - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \Delta^* \lambda_i^* \right)^2 \right]^{1/2}.$$

Применение метрологического эксперимента для определения  $\theta[\Delta^* \lambda_i^*]$  ошибки неидеальности усреднения и исходного преобразования, а также отличие  $\lambda_{gi}$  от  $\lambda_i$  носят случайный характер и их мерой может служить, как и для  $\Delta_{Kb}\theta^*[\Delta \lambda_i^*]$  вероятность попадания оценки в заданный интервал.

При проведении метрологического эксперимента определены погрешности конкретных результатов измерения коэффициентов тепло- и теплопроводности на эталонных материалах. Наиболее употребляемыми характеристиками погрешностей являются: математическое ожидание (систематическая погрешность), корень квадратный из дисперсии (средняя квадратическая погрешность), доверительный интервал и доверительная вероятность [6, 90].

Математическое ожидание погрешности позволяет не только получить информацию о постоянной составляющей погрешности, но и создает предпосылки для ее коррекции. Математическое ожидание абсолютной погрешности теплопроводности и теплопроводности определяется по следующим соотношениям:

$$M[\Delta a_j^*] = \lim_{m \rightarrow \infty} \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m \Delta a_j^* ; \quad (5.1)$$

$$M[\Delta \lambda_j^*] = \lim_{m \rightarrow \infty} \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m \Delta \lambda_j^* , \quad (5.2)$$

где  $m$  – число измерительных экспериментов.

Средняя квадратическая погрешность абсолютной погрешности температуро- и теплопроводности рассчитывается по формулам

$$\sigma[\Delta a_j^*] = \left[ \lim_{m \rightarrow \infty} \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m (\Delta a_j^* - M[\Delta a_j^*])^2 \right]^{\frac{1}{2}}; \quad (5.3)$$

$$\sigma[\Delta \lambda_j^*] = \left[ \lim_{m \rightarrow \infty} \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m (\Delta \lambda_j^* - M[\Delta \lambda_j^*])^2 \right]^{\frac{1}{2}}. \quad (5.4)$$

Определение характеристики случайной погрешности позволяет составить представление об интенсивности случайной погрешности и соотнести полученную информацию с предъявляемыми требованиями. Устанавливая связь средней квадратической погрешности с параметрами блоков измерительной цепи ИИИС, определяются необходимые значения этих параметров, удовлетворяющие предъявляемым требованиям.

Характеристики относительной погрешности тепло- и температуропроводности рассчитываются по следующим формулам:

$$M^*[\delta a_j^*] = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m \delta a_j^*; \quad (5.5)$$

$$\sigma^*[\delta a_j^*] = \left[ \frac{1}{m-1} \sum_{j=1}^m (\delta a_j^* - M^*[\delta a_j^*])^2 \right]^{\frac{1}{2}}; \quad (5.6)$$

$$M^*[\delta \lambda_j^*] = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m \delta \lambda_j^*; \quad (5.7)$$

$$\sigma^*[\delta \lambda_j^*] = \left[ \frac{1}{m-1} \sum_{j=1}^m (\delta \lambda_j^* - M^*[\delta \lambda_j^*])^2 \right]^{\frac{1}{2}}. \quad (5.8)$$

Предельные абсолютные и относительные погрешности коэффициентов тепло- и температуропроводности определяются следующим образом:

$$\Delta_{\text{пред}} a_j^* = M[\Delta a_j^*] + t_{a, n-1} \sigma[\Delta a_j^*]; \quad (5.9)$$

$$\Delta_{\text{пред}} \lambda_j^* = M[\Delta \lambda_j^*] + t_{a, n-1} \sigma[\Delta \lambda_j^*]; \quad (5.10)$$

$$\delta_{\text{пред}} a_j^* = \frac{\Delta_{\text{пред}} a_j^*}{a_j}; \quad (5.11)$$

$$\delta_{\text{пред}} \lambda_j^* = \frac{\Delta_{\text{пред}} \lambda_j^*}{\lambda_j}, \quad (5.12)$$

где  $t_{a, n-1}$  – коэффициент Стьюдента при доверительной вероятности  $a = 0,95$  и количестве измерений  $n - 1$ .

Результаты теплофизического эксперимента, реализующего новый оперативный интеллектуальный метод определения ТФСМ, приведены в табл. 5.1 и 5.2.

Теплофизические измерения, результаты которых отображены в табл. 5.1 и 5.2, проведены при мощности теплового воздействия от линейного источника тепла  $P = 10$  Вт, в точке контроля  $x_2$ , расположенной на расстоянии 0,002 м от линейного источника тепла в моменты времени  $\tau_1 = 5$  с,  $\tau_2 = 120$  с. В таблицах обозначены:  $T_1, T_2$  – значения контролируемых температур в точке  $x_2$  и моменты времени  $\tau_1, \tau_2$ ;  $a$  и  $\lambda$  – коэффициенты температуро- и теплопроводности соответственно.

В табл. 5.1 представлены данные теплофизического эксперимента на аттестованном образце ПММ, а в табл. 5.2 – рипоре.

Результаты обработки метрологического эксперимента на эталонных образцах из ПММ и рипора представлены в табл. 5.3.

**5.1. Результаты метрологического эксперимента на эталонном образце из ПММ**

№ п/п	$T_1, ^\circ\text{C}$	$T_2, ^\circ\text{C}$	$a \cdot 10^{-7}, \text{ м}^2/\text{с}$	$\lambda, \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$
1	8,2	16,8	1,09	0,196
2	8,0	17,2	1,09	0,195
3	8,5	16,7	1,05	0,193
4	7,5	17,1	1,12	0,199
5	8,1	16,9	1,10	0,198
6	7,4	17,3	1,13	0,197
7	7,2	16,8	1,07	0,194
8	7,8	17,4	1,07	0,199
9	8,2	17,5	1,08	0,196
10	8,0	16,8	1,12	0,198
11	7,9	17,1	1,13	0,197
12	8,1	16,8	1,07	0,193
13	8,3	17,4	1,10	0,194
14	8,2	17,2	1,09	0,196
15	8,1	17,5	1,07	0,194
16	7,8	17,3	1,08	0,194
17	8,4	17,1	1,12	0,197
18	8,3	16,7	1,09	0,198
19	8,0	17,3	1,08	0,195
20	7,9	16,8	1,09	0,198

**5.2. Результаты метрологического эксперимента на эталонном образце из рипора**

№ п/п	$T_1, ^\circ\text{C}$	$T_2, ^\circ\text{C}$	$a \cdot 10^{-7}, \text{ м}^2/\text{с}$	$\lambda, \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$
1	13,8	30,2	4,53	0,028
2	14,7	30,3	4,77	0,029
3	14,2	30,4	4,57	0,028
4	14,1	29,9	4,65	0,029
5	14,4	30,2	4,70	0,029
6	14,1	30,4	4,51	0,027
7	14,3	30,5	4,72	0,029
8	13,10	30,0	4,66	0,029
9	14,5	30,1	4,54	0,028
10	14,1	30,2	4,65	0,028
11	14,8	29,9	4,56	0,028
12	14,4	30,4	4,63	0,029
13	13,8	30,4	4,68	0,028
14	14,1	30,2	4,57	0,027
15	14,4	30,2	4,54	0,028
16	14,6	29,8	4,75	0,029
17	14,1	29,7	4,59	0,027

18	14,4	30,2	4,60	0,028
19	14,7	30,4	4,53	0,027
20	14,9	29,8	4,68	0,029

Проведена оценка погрешностей и их характеристик при использовании известных методик поверки рабочих средств измерений [91 – 93]. В соответствии с этими методиками в качестве основных характеристик погрешностей измерения ТФСМ определялись математическое ожидание (систематическая погрешность) и среднеквадратическое отклонение случайной составляющей погрешности результата измерений. Математическое ожидание результатов определения коэффициентов тепло- и температуропроводности рассчитывалось по формулам (5.1) и (5.2), а среднеквадратическая погрешность – по формулам (5.3), (5.4).

### 5.3. Результаты метрологической обработки теплофизических измерений на эталонных образцах

Погрешности и характеристики погрешностей измерений	Эталонные образцы	
	ПММ	Рипор
$M[\Delta a_j^*]$	$1,64 \cdot 10^{-9}$	$5,58 \cdot 10^{-9}$
$\sigma[\Delta a_j^*]$	$8,55 \cdot 10^{-10}$	$3,18 \cdot 10^{-9}$
$M^*[\delta a_j^*]$	1,39 %	1,19 %
$\sigma^*[\delta a_j^*]$	0,80 %	0,68 %
$\Delta_{\text{пред}} a_j^*$	$3,33 \cdot 10^{-9}$	$1,19 \cdot 10^{-8}$
$M[\Delta \lambda_j^*]$	$1,72 \cdot 10^{-3}$	$6,70 \cdot 10^{-4}$

Из оценки результатов метрологического эксперимента следует, что максимальное значение систематической погрешности по температуропроводности  $M^*[\delta a_j^*] = 1,39\%$  по теплопроводности  $M^*[\delta \lambda_j^*] = 2,35\%$ , максимальное значение случайной составляющей погрешности по температуропроводности  $\sigma^*[\delta a_j^*] = 0,80\%$ , по теплопроводности  $\theta = 1,67\%$ , что соответствует предъявляемым требованиям к точности теплофизических измерений.

Метрологический анализ результатов теплофизического эксперимента на эталонных материалах позволяет установить, что систематическая и случайная составляющие основной погрешности измерения значительно меньше в применяемом интеллектуальном методе теплофизического измерения, по сравнению с известными методами в результате коррекции результатов измерений при воздействии внутренних и внешних дестабилизирующих факторов и использования интеллектуальных процедур для выбора оптимальных параметров теплофизических измерений в зависимости от измерительной ситуации.

### 5.2. ОБРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ И АНАЛИЗ ПОГРЕШНОСТЕЙ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ ТФСМ

Проведены исследования ТФС строительных материалов с помощью разработанной ИИИС НК ТФСМ. В табл. 5.4 приведены результаты метрологической обработки теплофизических измерений строительных материалов. Относительная погрешность измерения составляет не более 4%. Выполнены экспериментальные исследования ТФС серии новых композиционных материалов строительного назначения, результаты которых изложены в работе [94]. Проведены теплофизические измерения по определению ТФС полимерных материалов и изделий из них с помощью ИИИС НК ТФСМ. В качестве объектов теплофизических испытаний в данной работе использовались следующие полимерные материалы: гетинакс; текстолит; полиэтилен

низкого давления; полиэтилен высокого давления; полиметилметакрилат. В табл. 5.5 показаны результаты метрологической обработки теплофизических измерений полимерных материалов. Максимальная погрешность измерения составляет 3,6 %.

Анализ результатов испытаний полимерных материалов позволяет установить, что данные материалы отличаются сравнительно низкой теплопроводностью (до 0,43 Вт/(м·К)).

С помощью ИИИС НК ТФСМ проведены теплофизические измерения на теплоизоляционных материалах. В табл. 5.6 представлены результаты метрологической обработки экспериментальных исследований теплоизоляционных материалов (рипора, минваты, войлока и др.); в табл. 5.7 – винилискож-НТ, в табл. 5.8 – пенопластов и линолеумов.

Искусственная винилискожа-НТ находит широкое применение в автомобильной, галантерейной, строительной и ряде других отраслей промышленности. Однослойная винилискожа-НТ используется для изготовления галантерейных изделий, многослойная – в качестве тепло- шумоизоляторов для обивки стен зданий, салонов автомобилей и т.д. При изготовлении винилискож-НТ основным параметром контроля, определяемым ГОСТом на производство винилискож-НТ, является теплопроводность. Погрешность определения ТФС винилискож и изделий из них ИИИС НК ТФСМ составляет не более 3,5 %. Относительная погрешность определения ТФС теплоизоляционных материалов не более 2,5 %, пенопластов и линолеумов – 2,8 %.

#### 5.4. Результаты метрологической обработки теплофизических измерений строительных материалов

Материалы	Эталонные значения		Измеренные значения		Относительная погрешность измерения	
	$a, \text{ м}^2/\text{с} \cdot 10^{-7}$	$\lambda, \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$	$a, \text{ м}^2/\text{с} \cdot 10^{-7}$	$\lambda, \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$	$\delta_a, \%$	$\delta_\lambda, \%$
1. Газосиликат (1)	3,47	0,23	3,61	0,239	4,00	3,91
2. Газосиликат (2)	3,80	0,26	3,95	0,27	3,94	3,84
3. Бетон	1,58	0,54	1,64	0,56	3,79	3,70
4. Цемент	0,86	0,84	0,89	0,87	3,49	3,57
5. Дерево	4,84	0,15	5,02	0,156	3,72	4,00
6. Асбест	5,52	0,65	5,70	0,67	3,26	3,08

#### 5.5. Результаты метрологической обработки теплофизических измерений полимерных материалов

Материалы	Эталонные значения		Измеренные значения		Относительная погрешность измерения	
	$a, \text{ м}^2/\text{с} \cdot 10^{-7}$	$\lambda, \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$	$a, \text{ м}^2/\text{с} \cdot 10^{-7}$	$\lambda, \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$	$\delta_a, \%$	$\delta_\lambda, \%$
1. ПММ	1,09	0,195	1,10	0,198	1,00	1,54
2. Гетинакс	1,63	0,35	1,68	0,34	3,07	2,86
3. Текстолит	1,121	0,43	1,08	0,44	3,57	2,33
4. Полиэтилен низкого давления	1,55	0,16	1,60	0,165	3,23	3,13
5. Полиэтилен высокого давления	0,68	0,36	0,70	0,37	2,94	2,77

### 5.6. Результаты метрологической обработки теплофизических измерений теплоизоляционных материалов

Материалы	Эталонные значения		Измеренные значения		Относительная погрешность измерения	
	$a, \text{ м}^2/\text{с}\cdot 10^{-7}$	$\lambda, \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$	$a, \text{ м}^2/\text{с}\cdot 10^{-7}$	$\lambda, \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$	$\delta_a, \%$	$\delta_\lambda, \%$
1. Рипор	4,61	0,028	4,66	0,0283	1,08	1,07
2. Минвата повышенной жесткости	3,47	0,046	3,39	0,045	2,31	2,17
3. Минвата полужесткая	3,93	0,04	3,85	0,039	1,93	2,5
4. Войлок	4,65	0,08	4,55	0,082	2,15	2,5
5. Минвата «Гераклит»	3,67	0,037	3,75	0,038	2,18	2,70
6. Минвата «Изоруф»	3,29	0,038	3,35	0,039	1,82	2,63
7. Минвата «Изолайт»	6,60	0,032	6,75	0,033	2,27	3,12
8. Минвата «Изолент»	3,52	0,035	3,60	0,036	2,27	2,85

### 5.7. Результаты метрологической обработки теплофизических измерений винилискожи-НТ

Материалы	Эталонные значения		Измеренные значения		Относительная погрешность измерения	
	$a, \text{ м}^2/\text{с}\cdot 10^{-7}$	$\lambda, \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$	$a, \text{ м}^2/\text{с}\cdot 10^{-7}$	$\lambda, \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$	$\delta_a, \%$	$\delta_\lambda, \%$
1. Винилискожа-НТ(1)	1,60	0,05	1,65	0,049	3,12	2,00
2. Винилискожа-НТ(2)	1,80	0,067	1,85	0,069	2,77	2,98
3. Винилискожа-НТ(3)	1,55	0,056	1,58	0,057	1,94	1,79
4. Винилискожа-НТ(4)	1,47	0,048	1,49	0,047	2,04	2,08
5. Винилискожа-НТ(5)	1,58	0,06	1,62	0,058	2,53	3,33
6. Винилискожа-НТ(6)	1,61	0,048	1,65	0,049	2,48	2,08

### 5.8 Результаты метрологической обработки теплофизических измерений пенопласта и линолеумов

Материалы	Эталонные значения		Измеренные значения		Относительная погрешность измерения	
	$a, \text{ м}^2/\text{с}\cdot 10^{-7}$	$\lambda, \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$	$a, \text{ м}^2/\text{с}\cdot 10^{-7}$	$\lambda, \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$	$\delta_a, \%$	$\delta_\lambda, \%$
1. Пенопласт(1)	7,28	0,038	7,43	0,037	2,06	2,63
2. Пенопласт(2)	7,30	0,037	7,15	0,036	2,05	2,70
3. Пенопласт(3)	7,12	0,039	7,26	0,038	1,97	2,56
4. Линолеум(1)	1,15	0,081	1,17	0,083	1,74	2,45
5. Линолеум(2)	1,68	0,091	1,73	0,093	2,97	2,19
6. Линолеум(3)	1,90	0,091	1,85	0,089	2,63	2,19
7. Линолеум(4)	1,13	0,11	1,100	0,113	2,65	2,72

Уменьшение погрешности измерений при использовании ИИИС НК ТФСМ связано как с интеллектуализацией измерительного средства, так и с применением нового интеллектуального метода измерения. Особенностью ИИЗ является определение среднеинтегрального значения избыточ-

ных температур в области контакта ИИЗ и ИМ, устранение влияния  $T_{OC}$ , что способствует уменьшению случайной составляющей погрешности результатов измерения. Интеллектуальный метод позволяет определить оптимальные режимные параметры  $\beta^*$ ,  $\tau_{уст}^*$ ,  $\tau_{уср}^*$  и энергетические – мощность теплового воздействия, адаптация по которым к классам ИМ, коррекция результатов измерения ТФСМ на воздействие ДФ также способствует уменьшению общей погрешности измерений ТФСМ. Применение в ИИИС РС микроконтроллера с большой памятью, создание базы знаний, разработка математического и программного обеспечения позволили осуществить интеллектуализацию ИИС и применить интеллектуальные процедуры при проведении теплофизических измерений, что повысило метрологический уровень теплофизических измерений.

Приведенные результаты экспериментальных исследований строительных, теплоизоляционных и полимерных материалов на базе ИИИС НК ТФСМ подтверждают соответствие метрологического уровня ИИИС НК ТФСМ современным требованиям к теплофизическим измерениям и возможность применения предлагаемой интеллектуальной информационно-измерительной системы в лабораторных и производственных условиях для контроля ТФС.

### 5.3. ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ИИИС НК ТФСМ

Интеллектуальную систему НК ТФСМ можно считать эффективной, если критерии, которые оценивают техническую и экономическую эффективность, оптимальны для данного назначения системы и соответствуют известным общим рекомендациям [95]: отражать общее назначение системы, обладать конструктивностью, позволяющей относительно просто определять их численное значение для ИИИС, учитывать параметры системы, позволяющие их варьировать.

В общем виде критерий эффективности можно представить в виде функционала

$$K_{\varepsilon} = F(\mathbf{X}, \mathbf{Y}, \mathcal{E}),$$

где  $\mathbf{X} = (x_1, x_2, \dots, x_n)$  – вектор оптимальных режимных, энергетических и структурных параметров системы, которые определяются и варьируются в результате применения интеллектуальных процедур в ИИИС НК ТФСМ и которыми можно изменять численное значение критерия  $K_{\varepsilon}(\tau_{уср}^*, \tau_{уст}^*, n^*, \beta^*, K_d, U_{БП})$ ;  $\mathbf{Y} = (y_1, y_2, \dots, y_n)$  – вектор параметров системы, которые не варьируются в процессе функционирования ИИИС НК ТФСМ, но влияют на значение критерия эффективности – это воздействующие дестабилизирующие факторы ( $T_{OC}, R_T, \Psi, W$ ), а также структура ИМ, нечеткость и неопределенность получаемой измерительной информации, структура ИИИС, в том числе ИВУ и ИИЗ, результаты кластеризации и классификации, меры доверия к результатам НК ТФСМ.  $\mathcal{E} = (\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_n)$  – вектор показателей эффективности ИИИС НК ТФСМ, определяющий потери оперативности и точности системы.

Показатели эффективности ИИИС зависят от  $M_i, O_i, U_i, K_i, Z_i, \Psi_i, S_i$  (см. раздел 2.6).

Значение критерия определяется структурными, алгоритмическими, схемотехническими и конструктивными решениями при проектировании системы, а также условиями применения и воздействующими дестабилизирующими факторами.

В ИИИС НК ТФСМ критериями эффективности функционирования ИИИС являются точность, оперативность и надежность.

Если критерием является точность НК ТФСМ (критерий точности –  $K_T$ ), то определяемыми и варьируемыми параметрами, влияющими на точность определения ТФСМ, являются: показатель достижения установившегося теплового режима  $\beta^*$ ; мощность теплового воздействия ( $U_{БП}^*$ ); дестабилизирующие факторы ( $T_{OC}, R_T, \Psi, W$ ); показатель достижения температуры усреднения ( $\Delta\varepsilon_i$ ) в области контакта ИИЗ и вспомогательного образца; погрешность аналого-цифрового преобразования в измерительном канале; погрешность измерения температуры в области контакта ИИЗ и ИМ

–  $\Delta T_i^*$  (см. раздел 4.1); погрешность результата измерения коэффициента теплопроводности  $\Delta \lambda_i^*$  (см. раздел 4.1); погрешность результата измерения температуропроводности  $\Delta a_i^*$  (см. раздел 4.1); коэффициент усиления измерительного усилителя  $K_d$ ; результаты кластеризации и классификации; потери точности и оперативности, меры доверия к результатам НК ТФСМ.

Если критерием эффективности является оперативность (критерий оперативности –  $K_{оп}$ ), то определяемыми и варьируемыми параметрами являются: оптимальное время достижения усредненной температуры в области контакта ИИЗ и вспомогательного образца  $\tau_{уср}^*$ , оптимальное время достижения установившегося теплового режима в области контакта ИИЗ и ИМ  $\tau_{уст}^*$ , а также критерий зависит от применяемого алгоритма и метода НК ТФСМ – стационарного или нестационарного (импульсного).

Если критерием эффективности ИИИС НК ТФСМ является надежность, (критерий надежности –  $K_n$ ), то определяемыми параметрами являются потери точности и оперативности, меры доверия к результатам измерения.

Для получения более достоверного значения  $K_{э}$  не варьируемые параметры и структуры в ИИИС предлагается разделить на три группы и соответствующую информацию занести в базу знаний:

Значения и свойства которых известны, – структуры ИМ, ИВУ и ИИЗ.

Параметры и свойства, законы изменения и определения которых известны, – ДФ, результаты классификации и кластеризации.

Неопределенные параметры свойства, для которых известны области (диапазоны) изменения, – нечеткость и неопределенность получаемой априорной и измерительной информации.

Проектируемая ИИИС НК ТФСМ не может быть в целом оптимально эффективной, если оптимальным является только один из критериев эффективности ИИИС, – оперативность, точность, надежность. Поэтому эффективность систем будем оценивать по интегральному критерию ( $K_{и}$ ), который является функцией критериев оперативности, точности и надежности:

$$K_{и} = F(K_{оп}, K_{т}, K_{н}).$$

Предлагаемые критерии эффективности оценивают всю систему ИИИС НК ТФСМ. Однако, для того чтобы повысить достоверность оценки эффективности системы, необходимо оценить эффективность структурных составляющих ИИИС: ИИЗ, АЦП, БП, ИВУ, ИИ, БПР (см. раздел 3.6). В этом случае эффективность системы определяется по суммарному интегральному критерию эффективности в виде функционала:

$$K_{и\Sigma} = F(K_{иИИЗ}, K_{иАЦП}, K_{иБП}, K_{иИВУ}, K_{иИИ}, K_{иБПР}).$$

ИИИС НК ТФСМ будет оптимальной по эффективности функционирования, по достижению поставленной цели, если значения интегральных критериев эффективности всей системы будут находиться в области допустимых значений. Таким образом, поставленная цель в ИИИС НК ТФСМ будет достигнута, если

$$K_{и\Sigma} = K_{и\Sigma \text{ доп}},$$

где  $K_{и\Sigma \text{ доп}}$  – допустимые значения  $K_{и\Sigma}$ .

Область допустимых значений критерия  $K_{и}$  зависит от значений (интервалов, диапазонов значений) параметров ИИИС, которые позволяют получить значение суммарного интегрального критерия эффективности, относящееся к области допустимых значений.

В заключение следует отметить, что повышение эффективности функционирования ИИИС НК ТФСМ, осуществление поставленной цели – повышение оперативности, точности и надежности, достигнуто в результате интеллектуализации ИИИС и, как следствие, уменьшения аппаратных средств, по сравнению с ИИИС аналогичного назначения, замены схемотехнических решений мощным программным обеспечением, интеллекту-

альным интерфейсом, позволяющим принимать оптимальные решения в ИИИС при определении ТФСМ.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

---

---

В монографии показаны подход к интеллектуализации информационно-измерительных систем на примере информационно-измерительных систем неразрушающего контроля теплофизических свойств твердых материалов, созданные математические модели компонентов и процессов при проектировании ИИИС, разработанная архитектура информационно-измерительных систем.

Основным результатом данной работы является разработка теоретических и методических основ проектирования ИИИС, позволяющей повысить оперативность и точность НК ТФСМ.

Поставлены и решены следующие задачи:

- разработки математических моделей предметной области, разработки ИИИС НК ТФСМ и классификации исследуемых материалов, представления знаний, ИИИС НК ТФСМ, принятия решений в ИИИС;
- формирования подхода к интеллектуализации ИИС;
- создания архитектуры ИИИС НК ТФСМ, включающей интеллектуальные датчики, принимающей оптимальные решения при контроле ТФСМ в условиях неопределенности;
- разработки методов НК ТФСМ, использующих процедуры искусственного интеллекта при выборе методов и оптимальных параметров теплофизических измерений;
- разработки метрологического обеспечения ИИИС НК ТФСМ, заключающегося в метрологическом анализе результатов измерения с учетом воздействия дестабилизирующих факторов и выделении доминирующих компонентов в составе полной погрешности результатов измерения ТФСМ с последующим целенаправленным воздействием на эти доминанты с целью уменьшения общей погрешности измерения.

На основе представленных в работе методов НК ТФСМ, интеллектуального измерительного зонда, базы знаний, математического и программного обеспечения, структуры и алгоритма функционирования создана интеллектуальная информационно-измерительная объектно-ориентированная система со структурно-параметрической адаптацией к классу исследуемых материалов в результате принятия решения о выборе энергетических и режимных параметров, с автоматической коррекцией результатов измерения при воздействии ДФ.

Результаты работы могут использоваться разработчиками, аспирантами и студентами при проектировании информационно-измерительных систем на производстве, в научной работе и при выполнении курсовых проектов.

## **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

---

---

1. Романов, В.Н. Интеллектуальные средства измерений / В.Н. Романов, В.С. Соболев, Э.И. Цветков / под ред. д-ра техн. наук Э.И. Цветкова. М. : РИЦ «Татьянин день», 1994. 280 с.

2. Селиванова, З.М. Математическое моделирование информационно-измерительных систем контроля теплофизических свойств материалов /

З.М. Селиванова // Составляющие научно-технического прогресса : сб. материалов междунар. науч.-практ. конф. Тамбов, 2006. С. 119–122.

3. Шевельков, В.Л. Теплофизические характеристики изоляционных материалов / В.Л. Шевельков М.-Л. : Гос. энерг. изд-во. 1958. 96 с.

4. Зегжда, П.Д. Основные проблемы построения экспертных систем для автоматизации проектирования датчиков / П.Д. Зегжда, С.В. Молотков // Приборы и системы управления. 1989. № 9.

5. Варфоломеев, Б.Г. Совершенствование способов определения теплофизических свойств материалов / Б.Г. Варфоломеев, З.М. Селиванова // Автоматизированные системы: приборы аналитического контроля, информационные технологии : Тамб. гос. техн. ун-т. Тамбов, 1998. С. 73–78.

6. Методы электрических измерений / Л.Г. Журавин, М.А. Мариненко, Е.И. Семенов, Э.И. Цветков; под ред. Э.И. Цветкова. Л. : Энергоатомиздат, 1990. 288 с.

7. Варфоломеев, Б.Г. Оценка погрешности определения теплофизических характеристик материалов, обусловленной контактным термосопротивлением / Б.Г. Варфоломеев, В.Н. Грошев, З.М. Селиванова // Теплофизические проблемы промышленного производства : крат. тез. докл. междунар. совещ.-семинара молодых ученых / Тамб. ин-т хим. машиностр. Тамбов, 1992. С. 53.

8. Теплофизические свойства веществ / под ред. Н.Б. Варгафтика М.-Л. : Гос. энерг. изд-во, 1956. 367 с.

9. Теплофизические и реологические характеристики полимеров : справочник / под ред. Ю.С. Липатова. К. : Наук. думка, 1977. 244 с.

10. Геловани, В.А. Системы поддержки принятия решений в нештатных ситуациях с использованием современной информационной технологии / В.А. Геловани, В.Б. Бритков // Системные исследования. Методологические проблемы. Ежегодник 1995 – 1996. М. : Эдиториал УРСС, 1996. С. 179–190.

11. Селиванова, З.М. Адаптивное микропроцессорное средство для контроля теплофизических свойств материалов / З.М. Селиванова, Ю.Л. Муромцев // Информационные системы и процессы : сб. науч. тр. Тамбов–М.–СПб.–Баку : Изд-во «Нобелистика», 2004. Вып. 2. С. 157–164.

12. Селиванова, З.М. Анализ и синтез измерительных систем на множестве состояний функционирования / З.М. Селиванова, Ю.Л. Муромцев, В.Н. Чернышов // Дефектоскопия : Свердловск, 1993. № 9. С. 55–62.

13. Селиванова, З.М. Разработка адаптивных стратегий для измерительно-вычислительных систем неразрушающего контроля теплофизических свойств материалов и изделий / З.М. Селиванова // VI научная конференция ТГТУ : тез. докл. Тамбов, 2001. С. 218–219.

14. Селиванова, З.М. Анализ дестабилизирующих факторов, воздействующих на адаптивную измерительно-вычислительную систему неразрушающего контроля теплофизических свойств материалов и готовых изделий / З.М. Селиванова // Информационные технологии в проектировании микропроцессорных систем : тез. докл. Тамбов : Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2000. С. 94–96.

15. Селиванова, З.М. Система неразрушающего контроля теплофизических свойств материалов со структурно-параметрической адаптацией на воздействие дестабилизирующих факторов / З.М. Селиванова, В.Н. Чернышов // VI научная конференция ТГТУ : тез. докл. Тамбов, 2001. С. 217–218.

16. Минский, М. Фреймы для представления знаний / М. Минский; пер. с англ. М. : Энергия, 1979. 152 с.

17. Селиванова, З.М. Модель представления знаний в интеллектуальной системе контроля теплофизических свойств материалов / З.М. Селиванова, В.В. Кожаринов // *Фундаментальные и прикладные исследования, инновационные технологии, профессиональное образование* : сб. тр. XI науч. конф. ТГТУ. Тамбов : Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2006. С. 180–183.
18. Гаскаров, Д.В. Интеллектуальные информационные системы : учеб. для вузов / Д.В. Гаскаров. М. : Высш. шк., 2003. 431 с.
19. Заде, Л. Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенных решений / Л. Заде; пер. с англ. М. : Мир, 1976. 165 с.
20. Андрейчиков, А.В. Интеллектуальные информационные системы / А.В. Андрейчиков, О.Н. Андрейчикова М. : Финансы и статистика, 2004. 424 с.
21. Селиванова, З.М. Вопросы надежности интеллектуальных информационно-измерительных систем неразрушающего контроля теплофизических свойств твердых материалов / З.М. Селиванова, Д.Ю. Муромцев // *Надежность*. 2005. № 3. С. 43–47.
22. Муромцев, Ю.Л. Об одном классе интеллектуальных информационно-измерительных и управляющих систем / Ю.Л. Муромцев, З.М. Селиванова, Д.Ю. Муромцев // *Повышение эффективности средств обработки информации на базе математического моделирования* : сб. тр. VII Всерос. науч.-техн. конф. Тамбов, 2004. С. 71–77.
23. Романов, В.П. Интеллектуальные информационные системы в экономике : учеб. пособие / В.П. Романов; под ред. Н.П. Тихомирова. М. : Изд. «Экзамен», 2003. 496 с.
24. Преображенский, В.П. Теплотехнические измерения и приборы / В.П. Преображенский. М. : Энергия, 1978. 704 с.
25. Григорьев, А.С. Комплексное определение теплофизических свойств и влажности твердых материалов / А.С. Григорьев, Ю.Л. Муромцев, З.М. Селиванова // *Теплофизика релаксирующих систем* : крат. тез. докл. Всесоюз. совещ.-семинара молодых ученых / Тамб. ин-т хим. машиностр. Тамбов, 1990. С. 106.
26. Варфоломеев, Б.Г. Прибор для комплексного определения теплофизических характеристик и влажности твердых тел / Б.Г. Варфоломеев, Ю.Л. Муромцев, З.М. Селиванова // *Метрологическое обеспечение машиностроительных отраслей промышленности* : тез. докл. междунар. науч.-техн. конф. Минск, 1992. С. 53–54.
27. Селиванова, З.М. Метод уменьшения погрешности измерения теплофизических свойств твердых материалов при воздействии низких и высоких температур / З.М. Селиванова // *Методы и средства измерения физических величин* : тез. докл. IV Всерос. науч.-техн. конф. в 6 ч. Нижний Новгород : Нижегород. гос. техн. ун-т, 1999. Ч. 4. С. 5.
28. Селиванова, З.М. Адаптивная микропроцессорная система для определения теплофизических свойств материалов в среде с переменной температурой / З.М. Селиванова, В.Н. Чернышов // V науч.-техн. конф. ТГТУ : крат. тез. докл. Тамбов : Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2000. С. 258.
29. Цапенко, М.П. Измерительные информационные системы / М.П. Цапенко. М. : Энергоатомиздат, 1985. 440 с.
30. Михайлов, Е.В. Помехозащищенность информационно-измерительных систем / Е.В. Михайлов. М. : Энергия, 1975. 104 с.
31. Шевкопляс, Б.В. Микропроцессорные структуры / Б.В. Шевкопляс // *Инженерные решения* : справочник. М. : Радио и связь, 1990. 512 с.

32. Цветков, Э.И. Алгоритмические основы измерений / Э.И. Цветков. Л. : Энергоатомиздат, 1992. 254 с.
33. Отт, Г.У. Методы подавления шумов и помех в электронных схемах / Г.У. Отт; пер. с англ.; под ред. М.В. Гальперина. М. : Мир, 1979.
34. Микропроцессоры / В.Д. Вернер, Н.В. Воробьев, А.В. Горячев и др.; под ред. Л.Н. Преснухина. М. : Высш. шк., 1986. 383 с.
35. Микропроцессорные средства производственных систем / В.Н. Алексеев, А.М. Коновалов, В.Г. Колосов и др. Л. : Машиностроение, 1988. 287 с.
36. Селиванова, З.М. Модель адаптивной измерительно-вычислительной системы неразрушающего контроля теплофизических свойств материалов и изделий при воздействии дестабилизирующих факторов / З.М. Селиванова // Теплофизические измерения в начале XXI века : тез. докл. четвертой междунар. теплофиз. шк. Тамбов : Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2001. Ч. 2. С. 30–32.
37. Пат. № 20011229628 RU, GF17C9/00 РФ. Термозонд для неразрушающего контроля теплофизических свойств материалов и готовых изделий / В.Н. Чернышов, З.М. Селиванова. № 2170423; Заявл. 16.05.2000 // Бюллетень изобретений. № 19.
38. Селиванова, З.М. Оперативный метод неразрушающего контроля теплофизических свойств твердых материалов / З.М. Селиванова, В.Н. Чернышов // Вестник ТГТУ. 2002. Т. 8, № 1. С. 79–83.
39. Селиванова, З.М. Определение оптимального размещения датчиков термозонда для неразрушающего контроля теплофизических свойств материалов / З.М. Селиванова // VII научная конференция : пленар. докл. и тез. станд. докл. Тамбов : Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2002. Ч. 1. С. 100.
40. Селиванова, З.М. Адаптивная микропроцессорная система для качественной оценки свойств твердых материалов / З.М. Селиванова, Д.А. Бобаков // VII научная конференция ТГТУ : тез. докл. Тамбов : Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2002. С. 101.
41. Селиванова, З.М. Исследование метода и адаптивной системы неразрушающего контроля теплофизических материалов и изделий / З.М. Селиванова, В.Н. Чернышов // Теплофизические измерения в начале XXI века : тез. докл. четвертой междунар. теплофиз. шк. Тамбов : Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2001. Ч. 1 С. 85–86.
42. Селиванова, З.М. Методика повышения точности неразрушающего контроля теплофизических свойств твердых материалов / З.М. Селиванова, С.Н. Хабаров, М.М. Аношин // Труды ТГТУ : сб. науч. ст. молодых ученых и студентов. Тамбов : Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2003. Вып. 13. С. 208–211.
43. Селиванова, З.М. Интеллектуальная информационно-измерительная система неразрушающего контроля теплофизических свойств материалов / З.М. Селиванова // Информационные системы и процессы : сб. науч. тр. Тамбов–М.–СПб.–Баку–Вена : Изд-во «Нобелистика», 2004. Вып. 2. С. 126–130.
44. Муромцев, Ю.Л. Адаптивное микропроцессорное средство для контроля теплофизических свойств материалов / Ю.Л. Муромцев, З.М. Селиванова // Проектирование и технология электронных средств. 2002. № 3. С. 44–48.
45. Селиванова, З.М. Информационно-измерительная система неразрушающего контроля теплофизических свойств материалов / З.М. Селиванова // Информационные системы и процессы : сб. науч. тр. Тамбов–М.–СПб.–Баку–Вена : Изд-во «Нобелистика», 2003. С. 180–185.

46. Селиванова, З.М. Микропроцессорная система оперативного неразрушающего контроля теплофизических свойств материалов / З.М. Селиванова, В.В. Кожаринов // Труды ТГТУ : сб. науч. ст. молодых ученых и студентов. Тамбов : Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2004. Вып. 15. С. 173–176.
47. Селиванова, З.М. Информационно-измерительная система неразрушающего контроля теплофизических характеристик материалов / З.М. Селиванова // Электронная техника : межвуз. сб. науч. тр. Ульяновск, 2004. С. 41–44.
48. Селиванова, З.М. Об одном интеллектуальном методе неразрушающего контроля теплофизических свойств материалов / З.М. Селиванова, Ю.Л. Муромцев // Вестник ТГТУ. 2005. Т. 11, № 2А. С. 355–362.
49. Методы определения теплопроводности и температуропроводности / под ред. А.В. Лыкова. М. : Энергия, 1973. 336 с.
50. Микропроцессорная ИВС оперативного контроля / Ю.Л. Муромцев, В.И. Ляшков, З.М. Селиванова и др. // Гибкие автоматизированные производства и роботизация технологических процессов : сб. докл. конф. Тамбов, 1986. С. 91–92.
51. Муромцев, Ю.Л. Микропроцессорная ИВС оперативного контроля / Ю.Л. Муромцев, В.И. Ляшков, З.М. Селиванова // Сб. докл. обл. конф. НТО. Тамбов, 1986. С. 34–35.
52. Лыков, А.В. Теория теплопроводности / А.В. Лыков М. : Высш. шк., 1967. 599 с.
53. Селиванова, З.М. Алгоритм функционирования адаптивной микропроцессорной системы неразрушающего контроля теплофизических свойств материалов / З.М. Селиванова, Е.В. Морозова, П.С. Альбицкий // Труды ТГТУ : сб. тр. молодых ученых и студентов. Тамбов : Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2002. Вып. 11. С. 154–158.
54. Селиванова, З.М. Интеллектуальная система неразрушающего контроля теплофизических свойств материала / З.М. Селиванова, В.В. Кожаринов // Математические методы в технике и технологиях – ММТТ-18 : сб. науч. тр. XVIII междунар. науч. конф. Казань, 2005. С. 146–149.
55. Цветков, Э.И. Процессорные измерительные средства / Э.И. Цветков Л. : Энергоатомиздат, 1989. 233 с.
56. Селиванова, З.М., Чернышов В.Н. Термозонд для неразрушающего контроля теплофизических свойств материалов и изделий // Вестник ТГТУ. 2000. Т 6, № 3. С. 402–407.
57. Чернышов, В.Н. Адаптивный способ оперативного неразрушающего контроля теплофизических свойств материалов и измерительно-вычислительная система для его реализации / В.Н. Чернышов, З.М. Селиванова // Информационные технологии при проектировании микропроцессорных систем : тез. докл. Междунар. науч.-техн. конф. Тамбов : Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2000. С. 89–91.
58. Чернышов, В.Н. Адаптивный термозонд для неразрушающего контроля теплофизических свойств материалов / В.Н. Чернышов, З.М. Селиванова // Труды ТГТУ : сб. тр. молодых ученых. Тамбов, 2000. Вып. 5. С. 84–88.
59. Селиванова, З.М. Интеллектуальная информационно-измерительная система для определения качественных свойств минераловатных плит / З.М. Селиванова // Теплофизические измерения при контроле и управлении качеством : материалы пятой междунар. теплофиз. шк. Тамбов : Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2004. Ч. 2. С. 36–39.
60. Селиванова, З.М. Интеллектуальный измерительный зонд для неразрушающего контроля теплофизических свойств твердых материалов / З.М. Селиванова // Датчики, системы. 2005. № 2. С. 34–35.

61. Селиванова, З.М. Метод и интеллектуальная информационно-измерительная система для определения теплофизических свойств твердых материалов / З.М. Селиванова // Информационные системы и процессы : сб. науч. тр. / под ред. проф. В.М. Тютюнника. Тамбов–М.–СПб.–Баку–Вена : Изд-во «Нобелистика», 2005. Вып. 3. С. 137–142.

62. Селиванова, З.М. Измерительно-вычислительная система «Термис-М» / З.М. Селиванова, М.Е. Беспалов // Актуальные вопросы охраны окружающей среды : сб. докл. обл. науч. конф. Тамбов, 1987. С. 45–46.

63. Селиванова, З.М. Измерительно-вычислительная система с веером моделей для определения теплофизических свойств твердых материалов / З.М. Селиванова // Математическое моделирование и оптимизация систем переменной структуры : межвуз. сб. науч. тр. М. : Москов. ин-т хим. машиностр., 1989. С. 163–165.

64. Селиванова, З.М. Метод и адаптивная измерительно-вычислительная система неразрушающего контроля теплофизических свойств материалов и изделий при воздействии дестабилизирующих факторов / З.М. Селиванова, В.Н. Чернышов // Контроль, диагностика. 2001. № 1 (31). С. 12–15.

65. А.с. № 1341635 (СССР). Умножитель частоты. / Ю.Л. Муромцев, Е.И. Глинкин, З.М. Селиванова и др. Оpubл. 26.08.87, Бюл. № 36.

66. А.с. № 1171786 (СССР). Устройство для возведения в степень / Ю.Л. Муромцев, Е.И. Глинкин, З.М. Селиванова и др. Оpubл. 27.06.85, Бюл. № 29.

67. Селиванова, З.М. Интеллектуализация информационно-измерительных систем неразрушающего контроля теплофизических свойств материалов / З.М. Селиванова // X научная конференция ТГТУ : пленарные докл. и крат. тез. Тамбов : Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2005. С. 67.

68. Селиванова, З.М. Микропроцессорный измеритель температуры окружающей среды / З.М. Селиванова, Е.И. Глинкин // Актуальные вопросы охраны окружающей среды : краткие тез. докл. III обл. науч.-техн. конф. Тамбов : Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 1987. С. 49–50.

69. Селиванова, З.М. Программа для реализации интеллектуального метода неразрушающего контроля теплофизических свойств твердых материалов в интеллектуальной информационно-измерительной системе / З.М. Селиванова, В.В. Кожаринов // Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ, № 2006610041 от 10.01.2006.

70. Селиванова, З.М. Интеллектуальная информационно-измерительная система для определения теплофизических свойств твердых материалов / З.М. Селиванова // Проектирование и технология электронных средств. 2005. № 2. С. 35–37.

71. Муромцев, Ю.Л. Об одном интеллектуальном методе неразрушающего контроля теплофизических свойств твердых материалов / З.М. Селиванова, Ю.Л. Муромцев // Проектирование и технология электронных средств. 2005. № 1 С. 33–36.

72. Предко, М. Справочник по PIC-микроконтроллерам / М. Предко. М. : «ДМК Пресс», 2002. 512 с.

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

74. Муромцев, Ю.Л. Микропроцессорный регулятор температуры / Ю.Л. Муромцев, Е.И. Глинкин, З.М. Селиванова // Микропроцессорные системы : тез. докл. II Всесоюз. науч.-техн. конф. Челябинск, 1988. С. 71–72.

75. Селиванова, З.М. Исследование математических моделей теплофизических измерений в широком диапазоне температур / З.М. Селиванова

// Моделирование САПР, АСНИ и ГАП : сб. тр. всесоюз. конф. Тамбов, 1989. С. 131–132.

76. Шлыков, Ю.П. Контактное термическое сопротивление / Ю.П. Шлыков, Е.А. Ганин, С.Н. Царевский. М. : Энергия, 1977. 328 с.

77. Селиванова, З.М. Повышение точности и быстродействия теплофизических измерений полистирольных пенопластов и линолеумов / З.М. Селиванова, В.Н. Казаков // Повышение эффективности теплофизических исследований технологических процессов промышленного производства и их метрологического обеспечения : тез. докл. второй Междунар. теплофиз. шк. Тамбов : Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 1995. С. 246.

78. Селиванова, З.М. Микропроцессорная система для оперативного контроля теплопроводности многослойных линолеумов / З.М. Селиванова, В.В. Кожаринов // IX научная конференция ТГТУ : пленарные докл. и кратк. тез. Тамбов : Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2004. С. 109–110.

79. Селиванова, З.М. Способ определения теплопроводности винилискожи-НТ / З.М. Селиванова // 1 научная конференция ТГТУ : кратк. тез. докл. Тамбов : Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 1994. С. 105–106.

80. Селиванова, З.М. Применение адаптивной микропроцессорной системы для неразрушающего контроля качественных характеристик материалов / З.М. Селиванова, Ю.Л. Муромцев // Фундаментальные и прикладные проблемы приборостроения, информатики, экономики и права. Книга «Приборостроение» : науч. тр. V Междунар. науч.-практ. конф. М., 2002. С. 141–144.

81. Селиванова, З.М. Микропроцессорная система дистанционного контроля теплофизических свойств материалов / З.М. Селиванова, Ю.Л. Муромцев, Д.В. Ермолаев // IX научная конференция ТГТУ : пленарные докл. и кратк. тез. Тамбов : Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2004. С. 105.

82. Варфоломеев, Б.Г. Способ повышения точности определения теплопроводности твердых тел / Б.Г. Варфоломеев, Ю.Л. Муромцев, З.М. Селиванова // Повышение эффективности средств обработки информации на базе математического и машинного моделирования : материалы 4 Всерос. конф. / Тамб. высшее военное авиационное инженерное училище им. Ф.Э.Дзержинского. Тамбов, 1995. С. 352–353.

83. Казаков, В.Н. Некоторые оценки функциональной надежности результатов теплофизических измерений / В.Н. Казаков, З.М. Селиванова // Вестник ТГТУ. 1996. Т. 2, № 4. С. 386–388.

84. Рабинович, С.Г. Погрешности измерений / С.Г. Рабинович. Л. : Энергия, 1978. 260 с.

85. Сергеев, О.А. Метрологические основы теплофизических измерений / О.А. Сергеев. М. : Изд-во стандартов, 1972. 155 с.

86. Муромцев, Ю.Л. Оценка погрешности результатов измерения теплофизических свойств твердых материалов при воздействии дестабилизирующих факторов / Ю.Л. Муромцев, В.Н. Чернышов, З.М. Селиванова // Вестник ТГТУ. 2003. Т. 9, № 3. С. 414–423.

87. Мищенко, С.В. Анализ и синтез измерительных систем / С.В. Мищенко, Ю.Л. Муромцев, Э.И. Цветков, В.Н. Чернышов. Тамбов : ТГТУ, 1995. 234 с.

88. Цветков, Э.И. Процессорные измерительные средства / Э.И. Цветков. Л. : Энергоатомиздат, 1989. 233 с.

89. Чернышов, В.Н. Анализ характеристик погрешностей результатов косвенных измерений коэффициентов тепло- и температуропроводности твердых материалов / В.Н. Чернышов, Э.И. Цветков // Метрология. 1994, № 3. С. 29–36.

90. Новицкий, П.В. Оценка погрешностей результатов измерения / П.В. Новицкий, И.А. Зограф. Л. : Энергоатомиздат, 1991. 304 с.

91. Маркин, Н.С. Основы теории обработки результатов измерений / Н.С. Маркин. М. : Изд-во стандартов, 1991. 176 с.

92. Методика поверки рабочих средств измерений теплопроводности, удельной теплоемкости и температуропроводности твердых тел. МИ-115-77 / сост. : Ю.А. Чистякова, Л.П. Левина. М. : Изд-во стандартов, 1978. 11 с.

93. М.И. 1317–86. ГСИ Результаты и характеристики погрешностей измерений. Формы представления. Способы использования при испытании образцов продукции и контроля их параметров. М. : Изд-во стандартов, 1986.

94. Кузьмин, И.В. Оценка эффективности и оптимизации автоматических систем контроля и управления / И.В. Кузьмин. М. : Советское радио, 1971. 194 с.

95. Цапенко, М.П. Измерительные информационные системы: Структуры и алгоритмы, системотехническое проектирование : учеб. пособие для вузов. 2-е изд., перераб. и доп. / М.П. Цапенко. М. : Энергоатомиздат, 1985.

96. Селиванова, З.М. Микропроцессорные системы контроля : учеб. пособие / З.М. Селиванова, Ю.Л. Муромцев, В.Н. Чернышов. Тамбов: Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та. 2004. 96 с.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

---

---

ВВЕДЕНИЕ .....	3
.....	
<b>1. ЗАДАЧИ И МОДЕЛИ ИНТЕЛЛЕКТУАЛИЗАЦИИ ИН-</b> <b>ФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ .....</b>	<b>6</b>
1.1. Постановка задач выбора метода контроля свойств материа- лов .....	6
1.2. Математические модели предметной области и исследуемых материалов .....	10
1.3. Задачи классификации исследуемых материалов .....	13

1.3.1. Постановка задачи классификации исследуемых материалов . . . . .	14
1.3.2. Алгоритм решения задачи классификации . . . . .	15
1.4. Распознавание образов и алгоритм выбора метода контроля свойств материалов . . . . .	25
1.5. Математические модели интеллектуальных информационно-измерительных систем и принятия решений в ИИИС . . . . .	29
<b>2. АРХИТЕКТУРА ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ . . . . .</b>	<b>34</b>
2.1. Задачи проектирования информационно-измерительных систем . . . . .	34
2.2. Стратегии проектирования интеллектуальных информационно-измерительных систем . . . . .	36
2.3. Информационная модель ИИИС . . . . .	37
2.4. Структура ИИИС . . . . .	41
2.4.1. Интеллектуальные измерительные датчики . . . . .	45
2.5. База знаний ИИИС . . . . .	48
2.6. Принятие решения в ИИИС . . . . .	60
2.6.1. Задачи принятия решения в ИИИС в условиях неопределенности . . . . .	62
2.7. Обеспечение надежности ИИИС . . . . .	65
2.8. Подход к интеллектуализации информационно-измерительных систем . . . . .	70
<b>3. ИНТЕЛЛЕКТУАЛИЗАЦИЯ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ТВЕРДЫХ МАТЕРИАЛОВ . . . . .</b>	<b>73</b>
3.1. Анализ дестабилизирующих факторов, воздействующих на ИИИС НК ТФСМ . . . . .	73
3.2. Оперативный метод неразрушающего контроля теплофизических свойств твердых материалов . . . . .	82
3.3. Интеллектуальный метод определения теплофизических свойств материалов . . . . .	90
3.4. Алгоритм, структура измерительной цепи, реализующие интеллектуальный метод определения ТФСМ . . . . .	100
3.5. Интеллектуальный измерительный зонд для НК ТФСМ . . . . .	105
3.6. Структурная схема ИИИС НК ТФСМ . . . . .	114
3.7. Функциональная схема ИИИС НК ТФСМ . . . . .	118
3.8. Алгоритм функционирования ИИИС НК ТФСМ . . . . .	121
<b>4. МЕТРОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ НК ТФСМ . . . . .</b>	<b>142</b>
4.1. Оценка погрешностей результатов измерений на основе математической модели исследуемого материала и уравнения измерений . . . . .	142
4.2. Выделение доминирующих компонент в составе полных погрешностей результатов измерения тепло- и температуропроводности . . . . .	153
<b>5. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ . . . . .</b>	<b>156</b>
5.1. Определение ТФС материалов и изделий с использованием ИИИС НК ТФСМ . . . . .	156

5.2. Обработка экспериментальных данных и анализ погрешностей результатов измерений ТФСМ . . . . .	163
5.3. Оценка эффективности ИИИС НК ТФСМ . . . . .	167
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ</b> . . . . .	170
<b>Список Литературы</b> . . . . .	171