

---

---

**А.В. ЧЕРНЫШОВ, Э.В. СЫСОЕВ,  
В.Н. ЧЕРНЫШОВ, Г.Н. ИВАНОВ,  
А.В. ЧЕЛНОКОВ**

---

---

**НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ  
ТЕПЛОЗАЩИТНЫХ СВОЙСТВ  
МНОГОСЛОЙНЫХ СТРОИТЕЛЬНЫХ  
ИЗДЕЛИЙ**

---

---

**МОСКВА  
«ИЗДАТЕЛЬСТВО МАШИНОСТРОЕНИЕ-1»  
2007**

---

---

**А.В. ЧЕРНЫШОВ, Э.В. СЫСОЕВ, В.Н. ЧЕРНЫШОВ, Г.Н. ИВАНОВ, А.В. ЧЕЛНОКОВ**

**НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ  
ТЕПЛОЗАЩИТНЫХ СВОЙСТВ  
МНОГОСЛОЙНЫХ СТРОИТЕЛЬНЫХ  
ИЗДЕЛИЙ**

Монография



---

МОСКВА  
«ИЗДАТЕЛЬСТВО МАШИНОСТРОЕНИЕ-1»  
2007

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

Р е ц е н з е н т ы:

Доктор технических наук, профессор  
Тамбовского высшего военного авиационного инженерного  
училища радиоэлектроники  
*П.А. Федюнин*

Доктор технических наук, профессор  
Тамбовского государственного технического университета  
*П.С. Беляев*

Ч49      Неразрушающий контроль теплозащитных свойств многослойных строительных изделий : монография / А.В. Чернышов, Э.В. Сысоев, В.Н. Чернышов, Г.Н. Иванов, А.В. Челноков. – М. : «Издательство Машиностроение-1», 2007. – 112 с. – 400 экз. – ISBN 978-5-94275-369-6.

Монография посвящена разработке методов и систем неразрушающего контроля теплозащитных свойств многослойных строительных изделий. Представлены физико-математические модели температурных полей в исследуемых объектах при контактном и бесконтактном тепловом воздействии от линейного, дискового или точечного источника тепла, адекватно описывающие тепловые процессы в контролируемых изделиях. Особое внимание уделено новым контактными и бесконтактными методам неразрушающего контроля теплозащитных свойств материалов многослойных строительных конструкций и изделий. Приведен анализ погрешностей результатов измерений разработанных методов.

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

УДК 681.5.017; 536.2.083  
ББК Н300.63-1с

ISBN 978-5-94275-369-6

© «Издательство Машиностроение-1», 2007  
© ГОУ ВПО «Тамбовский государственный  
технический университет» (ТГТУ), 2007

Научное издание

**ЧЕРНЫШОВ Алексей Владимирович,  
СЫСОЕВ Эдуард Вячеславович,  
ЧЕРНЫШОВ Владимир Николаевич,  
ИВАНОВ Геннадий Николаевич,  
ЧЕЛНОКОВ Андрей Викторович**

**НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ  
ТЕПЛОЗАЩИТНЫХ СВОЙСТВ МНОГОСЛОЙНЫХ СТРОИТЕЛЬНЫХ ИЗДЕЛИЙ**

*МОНОГРАФИЯ*

Редактор Т.М. Глинкина  
Инженер по компьютерному макетированию Т.А. Сынкова

Подписано в печать 18.10.2007.  
Формат 60×84/16. 6,51 усл. печ. л.  
Тираж 400 экз. Заказ № 674

«Издательство Машиностроение-1»,  
107076, Москва, Стромьинский пер., 4

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

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

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

Для решения этих актуальных задач строительной теплотехники был разработан комплекс новых методов и реализующих их систем неразрушающего контроля (НК) теплозащитных свойств многослойных строительных конструкций и изделий.

В работе предложены физико-математические модели температурных полей в исследуемых объектах при контактном и бесконтактном тепловом воздействии на них от линейного, дискового или точечного источника тепла, адекватно описывающие тепловые процессы в контролируемых изделиях. На основе полученных моделей разработаны новые, защищенные патентами на изобретения, эффективные в метрологическом отношении контактные и бесконтактные методы контроля теплозащитных свойств многослойных строительных конструкций и изделий без нарушения их целостности и эксплуатационных характеристик, а именно:

1) контактный метод НК теплофизических свойств (ТФС) трехслойных строительных конструкций, состоящий в одновременном использовании начальной стадии нестационарного (импульсно-динамического) и квазистационарного тепловых режимов в исследуемом многослойном изделии;

2) метод бесконтактного НК ТФС двухслойных строительных конструкций с коррекцией влияния степени черноты исследуемых объектов и прозрачности промежуточной среды между исследуемыми объектами и приемно-излучательными блоками на результаты измерения;

3) бесконтактный адаптивный метод НК ТФС двухслойных строительных конструкций, имеющий высокую точность и полную гарантию сохранения целостности и эксплуатационных характеристик исследуемых объектов в условиях ограниченной априорной информации об их свойствах, обусловленной адаптацией энергетических параметров теплофизического эксперимента и коррекцией результатов измерения на тепловые потери в окружающую среду, степень черноты поверхности исследуемых объектов и коэффициент прозрачности среды;

4) комбинированный оперативный метод НК ТФС трехслойных строительных конструкций, основанный на одновременном использовании контактного и бесконтактного тепловых воздействий на поверхность исследуемых объектов и обладающий высокой метрологической эффективностью, обусловленной использованием адаптивных измерительных процедур при определении энергетических параметров теплофизического эксперимента;

5) бесконтактный метод НК ТФС двухслойных строительных конструкций, использующий неподвижный измерительный зонд, обеспечивающий высокую для технологического контроля точность измерений, обусловленную уменьшением влияния на результаты эксперимента состояния поверхности исследуемого объекта и неучтенных тепловых потерь с нее. Кроме того, отсутствие погрешностей, присущих механически подвижным узлам в методах с подвижным измерительным зондом, значительно повышает метрологический уровень предложенного метода;

6) метод бесконтактного НК качества (толщины слоев, ТФС, а также пористости) многослойных металлических строительных конструкций, отличительной особенностью которого является бесконтактность измерения, оперативность и высокая производительность измерения.

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

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

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

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

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

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

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

Результаты работы найдут широкое применение и в других важнейших и ответственных отраслях техники, таких как ракетостроение, космическое аппаратостроение, атомная энергетика, теплотехника и т.д.

# 1. АКТУАЛЬНОСТЬ СОЗДАНИЯ ДОПОЛНИТЕЛЬНОЙ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИИ ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ

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

Традиционно расчет толщины дополнительной теплоизоляции ограждающих конструкций зданий и сооружений производится следующим образом. Исходя из санитарно-гигиенических и комфортных условий существующие ограждающие конструкции зданий и сооружений обеспечивают согласно СНиП II-3-79\* требуемое сопротивление теплопередаче  $R_0$ , которое определяется по формуле [1]:

$$R_0 = \frac{n(t_b - t_n)}{\Delta t_n \alpha_b},$$

где  $n$  – коэффициент, принимаемый в зависимости от положения наружной поверхности ограждающих конструкций по отношению к наружному воздуху по [1, табл. 3];  $t_b$  – расчетная температура внутреннего воздуха согласно ГОСТ 12.1.005–76 и норм проектирования соответствующих зданий и сооружений;  $t_n$  – расчетная температура наружного воздуха, принимаемая в соответствии с [1, п. 2.3];  $\alpha_b$  – коэффициент теплоотдачи внутренней поверхности ограждающих конструкций, принимаемый по [1, табл. 4].

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

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

Данные для расчета и величины теплотехнических показателей и коэффициентов взяты из СНиП II-3-79\* [1], влажностной режим помещения – нормальный, расчетная температура внутреннего воздуха  $t_b = 18 \text{ °C}$ .

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

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

$$R_{\text{доп}} = R_0^3 - R_0.$$

В нашем примере для жилого здания г. Тамбова:

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

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

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

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

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

Приведенный выше расчет является ориентировочным. Для того чтобы более точно определить толщину дополнительной теплоизоляции для конкретных ограждающих конструкций зданий и сооружений с известными геометрическими и теп-

лофизическими параметрами, можно воспользоваться приведенным выше расчетом, где сопротивление теплопередаче ограждающей конструкции  $R_0$  определяется по [1, ф-ла (4)]:

$$R_0 = \frac{1}{\alpha_v} + R_k + \frac{1}{\alpha_n},$$

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

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



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

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

Ниже представлены новые, защищенные патентами на изобретения [3 – 8], эффективные в метрологическом отношении контактные и бесконтактные методы и системы контроля ТФС многослойных строительных конструкций без нарушения их целостности и эксплуатационных характеристик.

### 2.1. КОНТАКТНЫЙ МЕТОД И СИСТЕМА НК ТФС ТРЕХСЛОЙНЫХ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Отличительной особенностью контактных методов НК ТФС материалов и изделий является непосредственный контакт источника тепловой энергии и термодатчиков с участком поверхности исследуемого объекта измерения для определения температурного поля в зоне теплового воздействия. Разработан новый контактный метод НК ТФС, позволяющий контролировать ТФС трехслойных строительных конструкций без нарушения их целостности и эксплуатационных характеристик, обладающий высоким метрологическим уровнем и широкими функциональными возможностями.

Сущность разработанного контактного метода заключается в следующем [7, 9]. На каждую из наружных поверхностей многослойной конструкции симметрично устанавливаются по одному зонду (рис. 2.1), в плоскости контакта первого из которых расположены дисковый нагреватель ДН и два линейных нагревателя ЛН1 и ЛН2, закрепленные на заданном расстоянии от центра дискового нагревателя. В этом же центре контактной плоскости помещена термопара Тп1. В контактной плоскости на заданном расстоянии  $x_1$  от линейных источников ЛН1 и ЛН2 помещены рабочие термопары ТР1 и ТР2, а во втором зонде на этом же расстоянии от линейных нагревателей ЛН3 и ЛН4 помещены рабочие термопары ТР3 и

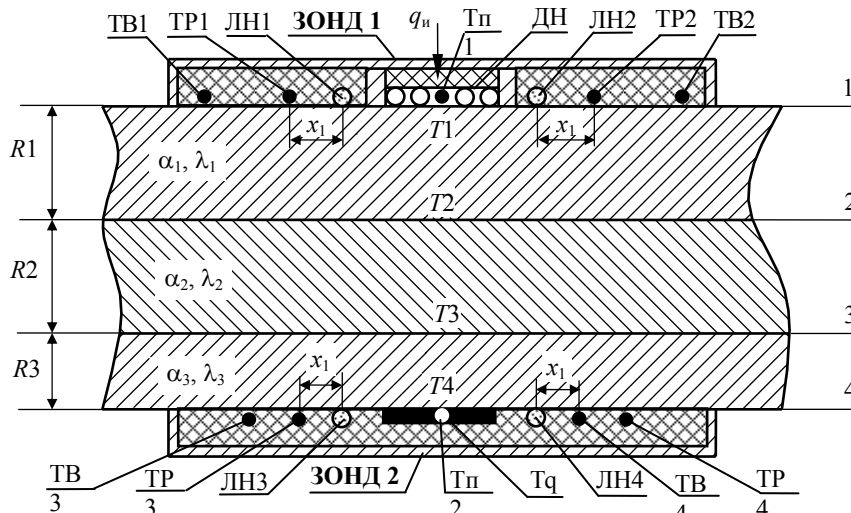


Рис. 2.1. Схема расположения нагревателей и термодатчиков в методе НК ТФС трехслойных строительных конструкций

ТР4. Вспомогательные термопары ТВ1 и ТВ2 в первом зонде и ТВ3, ТВ4 во втором зонде помещают на расстояниях, близких соответственно к толщине  $R1$  первого и  $R3$  третьего слоев исследуемого изделия. В плоскости контакта второго термозонда расположен датчик теплового потока  $T_q$ , а также в центре круга датчика теплового потока вмонтирована вторая термопара  $T_{п2}$ . На рис. 2.1 обозначены 1 – 4 – порядковые номера поверхностей слоев,  $R1$  –  $R3$  – толщины слоев.

Нагреватели, термопары и термодатчики как первого, так и второго зондов закрыты по внешней от контактной плоскости стороне теплоизоляционным материалом типа рипор или асбест, обуславливая направленное движение тепловых потоков на наружную поверхность конструкции и препятствуя теплообмену в других направлениях, тем самым обеспечивая реализацию адиабатического режима нагрева. Зонды поджимаются к наружной поверхности исследуемого изделия определенным усилием, сообщаемым грузом или пружиной (на чертеже не показаны). Расстояние  $x_1$  от линейных нагревателей до рабочих термопар берется в 3 – 5 раз меньше соответственно толщин слоев  $R1$  и  $R3$ , т.е. расстояний до вспомогательных термопар. В этом случае, изменяя адаптивно мощность линейных нагревателей и контролируя температуру нагрева исследуемых наружных слоев вспомогательными термопарами, можно установить такой режим теплового воздействия от линейных нагревателей (что будет показано ниже), при котором на результаты измерения температурных полей от действия линейных источников тепла практически не скажется влияние внутреннего (второго) слоя конструкции, т.е. первый и третий слой с большой достоверностью можно считать полубесконечными телами относительно тепловых процессов, обусловленных действием линейных источников тепла.

Определение ТФС наружных слоев конструкций осуществляют в соответствии с алгоритмом измерения, сущность которого заключается в следующем [10]. Вначале осуществляют тепловое воздействие одиночным тепловым импульсом заданной мощностью  $q_n$ , которая составляет не более 10 – 15 % от мощности  $Q_{\text{терм}}$ , при которой температура на линии действия источника тепла достигнет 0,6 – 0,8 значения температуры термодеструкции исследуемого материала, и определяют время релаксации  $\tau_{\text{рел}}$  (рис. 2.2, а) температурного поля в точке поверхности исследуемого тела, расположенной на заданном расстоянии  $x_1$  от линии действия источника тепла. Затем определяют минимальную частоту следования тепловых импульсов в соответствии с зависимостью  $F_{\text{мин}} = k/\tau_{\text{рел}}$ , где  $k$  – коэффициент, задаваемый в диапазоне от 2 до 5,  $\tau_{\text{рел}}$  – интервал времени от момента нанесения теплового импульса до момента, когда избыточная температура в точке контроля станет равной порогу чувствительности  $\varepsilon$  контрольно-измерительной аппаратуры (рис. 2.2, а). Осуществляют тепловое воздействие от линейного источника тепла, увеличивая частоту тепловых импульсов до момента, когда на вспомогательных термодатчиках ТВ1 и ТВ2 первого зонда или ТВ3 и ТВ4 соответственно второго зонда появится избыточная температура, величина которой будет составлять 0,1 – 0,2 К. При этом определяют максимальную частоту тепловых импульсов  $F_{\text{max1}}$ ,  $F_{\text{max2}}$  соответственно для первого и второго наружных слоев, т.е. определяют возможные диапазоны частот тепловых импульсов, при которых внутренний слой исследуемого изделия практически не оказывает влияния на температурные поля в наружных слоях при действии линейных импульсных источников тепла.

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

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

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

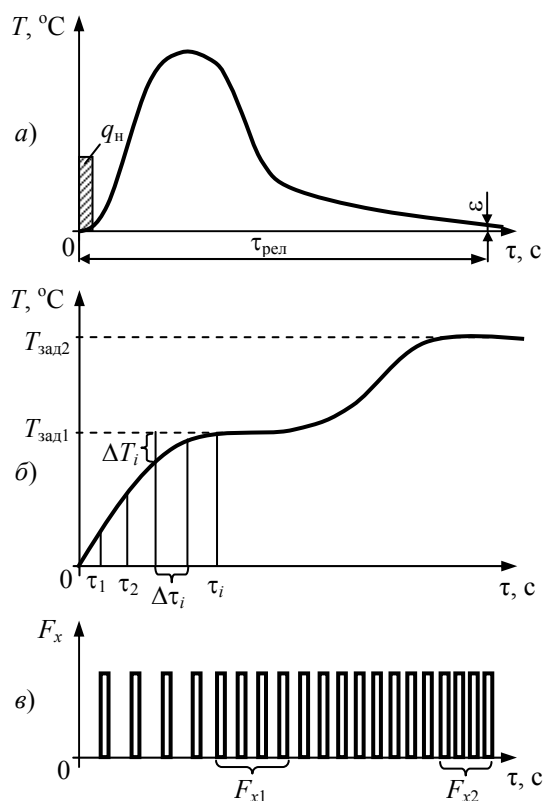


Рис. 2.2. Термограммы нагрева и вид теплового воздействия по методу НК ТФС трехслойных строительных конструкций

Увеличение частоты следования тепловых импульсов в соответствии с зависимостью (2.1) осуществляют до тех пор, пока установившееся квазистационарное значение температуры в точке контроля достигнет наперед заданного значения  $T_{\text{зад1}}$ , т.е.  $\Delta T_i = T_{\text{зад1}} - T(\tau_i) = 0$  (рис. 2.2, б). Установившееся значение температуры в точке контроля достигается тогда, когда очередной тепловой импульс из серии импульсов, подаваемых линейным источником, изменяет температуру в этой точке на величину, меньшую порога чувствительности  $\varepsilon$  контрольно-измерительной аппаратуры ( $\varepsilon \leq 0,01$  °С). Определяют частоту тепловых импульсов  $F_{x1}$ , после чего в соответствии с зависимостью (2.1) начинают увеличение частоты тепловых им-

пульсов до тех пор, пока значение избыточной контролируемой температуры в той же точке  $x_1$  не достигнет второго, наперед заданного значения  $T_{зад2}$  (рис. 2.2, в). Определяют при этом частоту тепловых импульсов  $F_{x2}$ , а искомые теплофизические свойства определяют по зависимостям, полученным на основании следующих рассуждений.

Процесс распространения тепла на теплоизолированной от внешней среды поверхности полубесконечного в тепловом отношении тела при действии линейного источника тепла  $q_n$  описывается решением задачи теплопроводности, которое имеет вид [11, 12]:

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

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

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

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

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

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

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

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

$$n = E(\tau_{рел}F), \quad (2.4)$$

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

Установившаяся температура в результате действия серии импульсов в точке контроля  $x_1$  на основании (2.2), для двух заданных значений  $T_{зад1}$  и  $T_{зад2}$  будет определяться соотношениями:

$$T_{зад1} = \frac{q_n F_{x1}}{2\pi\lambda} \sum_{i=1}^{n_1} \frac{1}{i} \exp\left(-\frac{x_1^2}{4a\Delta\tau_i}\right); \quad (2.5)$$

$$T_{зад2} = \frac{q_n F_{x2}}{2\pi\lambda} \sum_{i=1}^{n_2} \frac{1}{i} \exp\left(-\frac{x_2^2}{4a\Delta\tau_i}\right), \quad (2.6)$$

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

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

$$T_{зад1} = \frac{q_n F_{x1}}{2\pi\lambda} \left( \sum_{i=1}^{n_1} \frac{1}{i} - \frac{x_1^2 F_{x1}}{4a} \sum_{i=1}^{n_1} \frac{1}{i^2} \right); \quad (2.7)$$

$$T_{зад2} = \frac{q_n F_{x2}}{2\pi\lambda} \left( \sum_{i=1}^{n_2} \frac{1}{i} - \frac{x_2^2 F_{x2}}{4a} \sum_{i=1}^{n_2} \frac{1}{i^2} \right). \quad (2.8)$$

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

$$a = \frac{x_1^2}{4} \frac{T_{зад1} F_{x2}^2 \sum_{i=1}^{n_2} \frac{1}{i^2} - T_{зад2} F_{x1}^2 \sum_{i=1}^{n_1} \frac{1}{i^2}}{T_{зад1} F_{x2} \sum_{i=1}^{n_2} \frac{1}{i} - T_{зад2} F_{x1} \sum_{i=1}^{n_1} \frac{1}{i}}. \quad (2.9)$$

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

$$\lambda = \frac{q_n F_{x1}}{2\pi T_{зад1}} \sum_{i=1}^{n_1} \frac{1}{i} \exp\left(-\frac{x_1^2 F_{x1}}{4ai}\right). \quad (2.10)$$

Входящие в соотношения (2.7) и (2.8) и, соответственно, в конечные формулы для определения тепло- и температуропроводности исследуемых материалов (2.9) и (2.10) числа тепловых импульсов  $n_1$  и  $n_2$ , участвующих в формировании температурного поля в точке контроля  $x_1$  для двух установившихся состояний тепловой системы  $T(x_1, \tau) = T_{зад1}$  и  $T(x_1, \tau) = T_{зад2}$ , определяют в соответствии с выражением (2.4) по формуле  $n_i = E(\tau_{пер} F_{xi})$ , где  $i = 1, 2$ . Таким образом, используя соотношения (2.9) и (2.10) и имея информацию о частоте тепловых импульсов  $F_{x1}$  и  $F_{x2}$  для первого наружного слоя и о частотах  $F_{x3}$  и  $F_{x4}$  для второго наружного слоя, легко определить ТФС обоих наружных слоев.

Для определения ТФС материалов внутреннего слоя конструкции включают дисковый нагреватель ДН и осуществляют подвод к поверхности конструкции удельного теплового потока через круг до тех пор, пока на противоположной поверхности конструкции появится тепловой поток. Измеряют при этом величину теплового потока  $q_x$ , а также температуру в плоскостях 1 и 4 с помощью термпар Тп1 и Тп2. Перепад температур на первом слое конструкции определяется следующим соотношением [13]:

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

Отсюда температура в плоскости 2 определяется из соотношения

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

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

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

т.е.

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

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

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

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

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

Для определения коэффициента температуропроводности внутреннего слоя конструкции используем аналитическое решение [14], описывающее распределение температуры по толщине  $R_2$  слоя материала и во времени  $\tau$ :

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

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

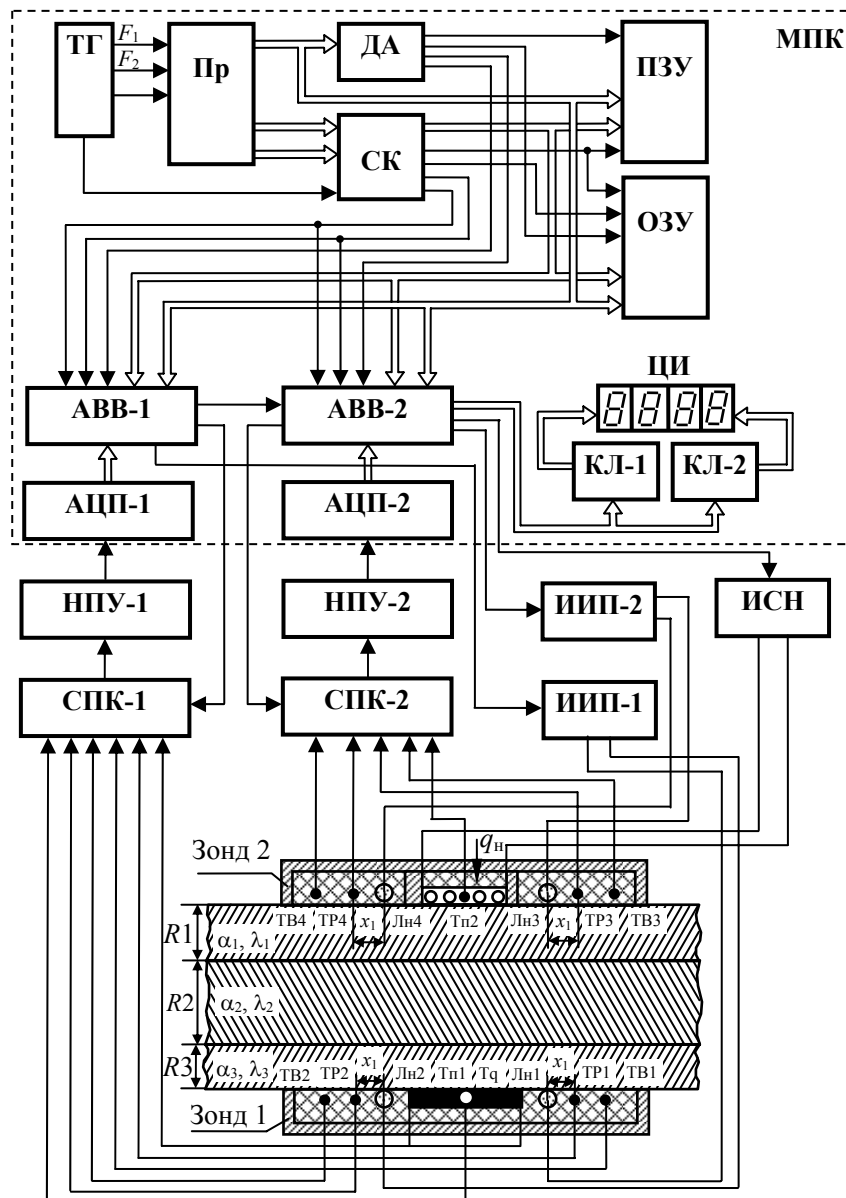
Экспериментальная проверка показала корректность основных теоретических выводов, положенных в основу предложенного метода НК ТФС многослойных строительных конструкций. Основным преимуществом разработанного метода НК ТФС по сравнению с известными методами является возможность с большой точностью и достоверностью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

Для реализации данного метода НК ТФС многослойных изделий разработана микропроцессорная ИИС [15, 16], блок-схема которой представлена на рис. 2.3. В схеме тактовый генератор (ТГ) предназначен для формирования двух тактовых последовательностей  $F_1$  и  $F_2$  для тактирования центрального процессора (Пр), формирования сигнала стробирования системного контроллера (СК).

Центральный процессор управляет функционированием всей системы, а именно:

- контролирует температуру в заданных точках контактных поверхностей обоих зондов, а также тепловой поток, пронизывающий трехслойное изделие от действия дискового нагревателя;

- формирует временную диаграмму обмена с аналого-цифровыми преобразователями АЦП-1, АЦП-2 и специализированными прецизионными коммутаторами СПК-1, СПК-2 с помощью сигналов, выдаваемых микропроцессором через адаптеры ввода-вывода АВВ-1 и АВВ-2;
- контролирует состояние кнопки «ПУСК» и активизирует цикл измерения только после нажатия;



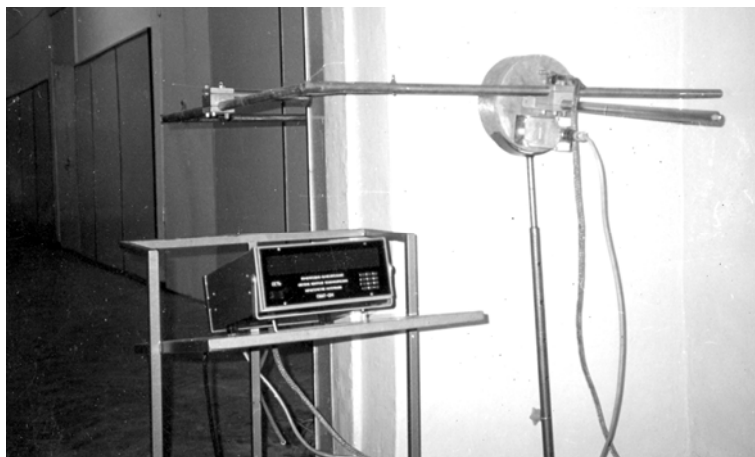
**Рис. 2.3. Схема микропроцессорной ИИС контактного НК ТФС трехслойных строительных конструкций**

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

Дешифратор адреса ДА предназначен для формирования сигналов ПЗУ, оперативного запоминающего устройства (ОЗУ), АВВ-1, АВВ-2. Системный контроллер СК буферизирует шину данных системы и формирует сигналы на чтение и запись в память ПЗУ и ОЗУ, а также чтение и запись в устройство ввода-вывода АВВ-1 и АВВ-2. Постоянное запоминающее устройство ПЗУ предназначено для хранения программного обеспечения системы, имеется возможность увеличения памяти ПЗУ до необходимого для реализации метода количества Кбайт. Оперативное запоминающее устройство ОЗУ предназначено для накопления и хранения промежуточных данных, результатов измерения. АВВ-1, АВВ-2 – параллельные адаптеры ввода-вывода предназначены для обмена сигналами и данными с внешними блоками и узлами системы. Системный контроллер СК, процессор Пр, дешифратор ДА, ОЗУ и ПЗУ, цифровой индикатор ЦИ, адаптеры АВВ-1 и АВВ-2, а также генератор тактовых импульсов ТГ являются основными блоками микропроцессорного контроллера МПК. Прецизионные норми-

рующие усилители ПНУ-1 и ПНУ-2 предназначены для усиления сигналов с первичных измерительных преобразователей (термопар и датчика теплового потока) и представляют собой сложную схему УПТ МДМ структуры и дифференциального усилительного каскада с автоматическим подавлением синфазной составляющей. Стабилизированный источник питания ИСП, а также импульсные источники питания ИП-1 и ИП-2 являются источниками напряжения для линейных и дискового нагревателей, управляются по заданным алгоритмам центрального процессора. Измерительные зонды выносные представляют собой конструкцию, совмещающую в себе систему нагревательных элементов и первично-измерительных преобразователей температура – напряжение и тепловой поток – напряжение. Контактные подложки зондов выполнены из теплоизоляционного и термостойкого материала.

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



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

Система работает следующим образом. При включении питания процессор устанавливается в исходное состояние и производится тестирование системы, после чего инициализируются периферийные устройства и устанавливаются в исходное состояние. Процессор  $Pr$  вырабатывает сигнал, по которому на четырехразрядном индикаторе ЦИ высвечивается приглашение к работе. После установки зондов на каждую из наружных поверхностей исследуемой трехслойной строительной конструкции (стеновой панели) оператор нажимает кнопку «ПУСК», после чего начинается выполнение автоматически измерения ТФС по заданному алгоритму, хранящемуся в ПЗУ. Микропроцессорный контроллер МПК в соответствии с алгоритмом реализуемого контактного метода НК ТФС трехслойных изделий подает команду соответственно через порты ввода-вывода АВВ-1 и АВВ-2 на импульсные источники питания ИИП-1 и ИИП-2, по которой осуществляется тепловое воздействие от линейных источников первого и второго зондов на наружные поверхности исследуемой трехслойной строительной конструкции. При этом частота тепловых импульсов в источниках увеличивается до момента, когда на вспомогательных термопарах ТВ-1 и ТВ-2 первого зонда и ТВ-3 и ТВ-4 соответственно второго зонда появится избыточная температура. Информация о максимальных частотах тепловых импульсов  $F_{max1}$ ,  $F_{max2}$  соответственно для первого и второго наружных слоев заносится в оперативную память ОЗУ. Затем ИИС адаптивно изменяет частоту тепловых импульсов в соответствии с зависимостью (2.1) разработанного контактного метода до тех пор, пока избыточная температура, контролируемая рабочими термопарами ТР-1 и ТР-2 первого зонда и соответственно ТР3 и ТР4 второго зонда не достигнет двух заранее заданных значений  $T_{зад1}$  и  $T_{зад2}$ . При осуществлении теплового воздействия от линейных источников обоих зондов система в соответствии с заданным алгоритмом опрашивает через специализированный прецизионный коммутатор СПК-1 соответственно рабочие термопары ТР1 и ТР2 и вспомогательные термопары ТВ1 и ТВ2 первого зонда, а через коммутатор СПК-2 рабочие термопары ТР3 и ТР4 и вспомогательные термопары ТВ3 и ТВ4 второго зонда и полученную измерительную информацию соответственно через нормирующие прецизионные усилители НПУ-1, НПУ-2, а также АЦП-1, АЦП-2 и устройства ввода-вывода АВВ-1 и АВВ-2 передает на соответствующие блоки микропроцессорной системы. При достижении установившихся температур в точках контроля процессор вырабатывает сигнал отключения нагревателей, который через устройство ввода-вывода АВВ-1, АВВ-2 подается на источники питания ИИП-1, ИИП-2. Полученные при этом частоты тепловых импульсов  $F_{x1}$  и  $F_{x2}$  соответственно в первом и втором зонде используют для определения ТФС наружных слоев исследуемого изделия по соотношениям (2.9) и (2.10). Затем по команде с адаптера ввода-вывода АВВ-2 включается источник стабилизированного напряжения ИСН и осуществляется тепловое воздействие от дискового нагревателя на исследуемое изделие. В соответствии с алгоритмом реализуемого контактного метода по команде с устройства ввода-вывода АВВ-2 коммутатор СПК-2 снимает информацию с термопары Тп1 о температуре в центре дискового нагревателя второго зонда, а по команде с устройства ввода-вывода АВВ-1 коммутатор СПК-1 снимает информацию о величине теплового потока с датчика Тq и температуре на контактной

поверхности изделия термопарой Тп2. Полученная при этом измерительная информация используется для определения ТФС внутреннего слоя конструкции в соответствии с формулами (2.15) и (2.16). После обработки всех экспериментальных данных полученные значения ТФС высвечиваются на цифровом индикаторе ЦИ в нормированном виде. После считывания полученной информации подается сигнал «сброс», который формируется соответствующей кнопкой, и система переходит в режим термостатирования, при котором происходит выравнивание температур измерительного зонда и контролируемого изделия. При достижении равенства температур зонды устанавливаются на других исследуемых конструкциях и процесс измерения повторяется.

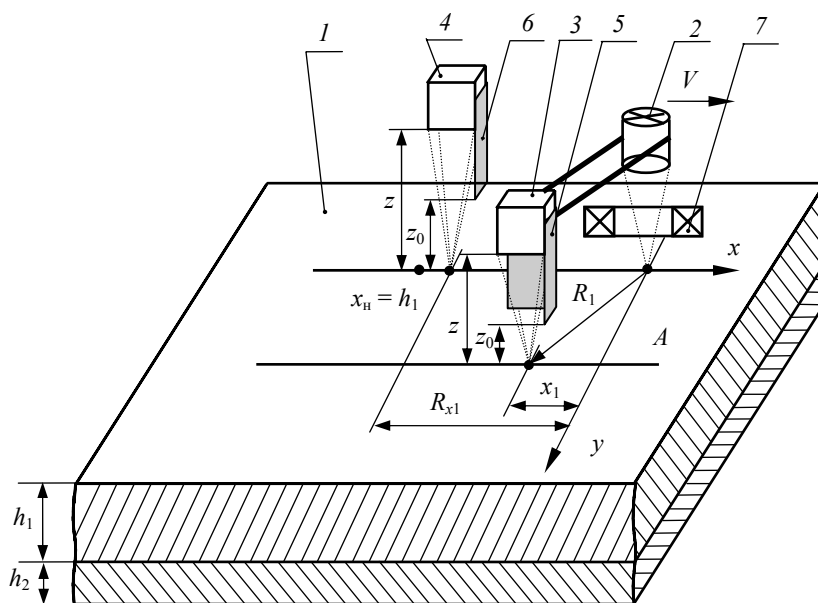
Данный алгоритм работы позволяет производить измерения практически непрерывно, что обеспечивает высокую производительность измерений как в условиях производства многослойных строительных конструкций и изделий, а также при эксплуатации (стеновых панелей, перекрытий, полов и т.д.). Простота и большая степень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

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

Основными достоинствами бесконтактных методов и измерительных систем являются высокое быстродействие, а следовательно, и высокая производительность контроля, дистанционность, возможность контроля при одно- и двухстороннем доступе к изделию и т.д. Поскольку в бесконтактных тепловых методах НК ТФС избыточную температуру нагреваемой поверхности исследуемых объектов контролируют термоприемниками по электромагнитному излучению, то основными источниками, влияющими на общую погрешность измерений, являются степень черноты исследуемых объектов, прозрачность среды между поверхностью исследуемых объектов и термоприемниками, влияние неучтенных тепловых потерь с поверхности исследуемых изделий в окружающую среду и т.д. Поэтому при создании новых бесконтактных методов и систем НК ТФС многослойных строительных изделий основное внимание уделяется разработке измерительных процедур, компенсирующих влияние вышеперечисленных источников общей погрешности измерений, либо вводится коррекция результатов измерения с учетом влияния этих составляющих общей погрешности измерений.

Сущность разработанного метода заключается в следующем [5, 17]. Над исследуемым двухслойным изделием *1* вначале с одной стороны помещают точечный источник тепловой энергии *2* и два термоприемника *3* и *4*, сфокусированных на поверхность, подверженную тепловому воздействию (рис. 2.5).

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



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

Вначале перемещают термодатчик 4 над исследуемым образцом и измеряют им температуру на поверхности исследуемого объекта. Синхронно с этим, используя высокоточный электрический термометр, измеряют температуру окружающей среды. В результате этого, используя отношение средней температуры, измеренной термодатчиком на поверхности объекта, к средней температуре окружающей среды, определяется коэффициент  $k$ , учитывающий значения степени черноты  $\epsilon$  поверхности исследуемого образца и прозрачности  $\beta$  окружающей среды, разделяющей поверхность исследуемого образца и приемно-излучательные блоки измерительной системы. Далее фокусируют термодатчик 3 в центр пятна нагрева источника, а термодатчик 4 в точку поверхности  $x_n$ , расположенную на линии движения источника и на расстоянии от пятна нагрева, равном толщине слоя изделия  $h_1$ . Включают источник энергии с начальной минимальной мощностью  $q_{\min}$ , при которой в центре пятна нагрева появляется избыточная температура  $T_1$ , уровень которой выше чувствительности термодатчика. Измерение избыточной температуры в центре пятна нагрева производят в моменты времени, когда окно термодатчика открыто, а лазерный луч перекрыт оптическим затвором 7. Использование оптического затвора позволяет исключить влияние источника энергии на результаты измерений температуры из-за прямого воздействия на термодатчик частично отраженного от поверхности объекта лазерного луча. Постепенно увеличивают мощность источника тепла и синхронно с перекрытием лазерного луча измеряют избыточную температуру в центре пятна нагрева. Увеличение мощности источника энергии осуществляют до тех пор, пока в точке  $x_n = h_1$  появится избыточная температура, равная  $0,1 - 0,2$  К, а контролируемая температура при этом в центре пятна нагрева непрерывно сравнивается с температурой термодеструкции исследуемого материала. Если значение этой температуры приближается к величине, равной  $0,8$  температуры термодеструкции, то увеличение мощности источника тепла прекращается. При этом фиксируют значение мощности источника тепла  $q_{\text{ит}}$ . Выбранная таким образом мощность источника тепла  $q_{\text{ит}}$  обеспечивает такой режим нагрева, при котором, во-первых, исследуемый слой изделия можно считать полубесконечным в тепловом отношении телом, так как на тепловой режим в этом случае не будет практически оказывать влияние второй (нижний) слой изделия, во-вторых, нагрев исследуемого слоя будет производиться до температуры, величина которой ниже температуры термодеструкции материала исследуемого слоя, что обеспечит гарантию сохранения его целостности. Затем постепенно смещают термодатчик 4 из точки  $x_n$  по линии движения к источнику тепла в соответствии с зависимостью  $x_{i+1} = x_i + \Delta x$ , где

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

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

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

Известно [18], что при нагреве поверхности полубесконечного в тепловом отношении тела подвижным точечным источником тепловой энергии избыточная предельная температура поверхности этого тела в точках, перемещающихся вслед за источником по линии его движения со скоростью, равной скорости перемещения источника энергии, определяется зависимостью:

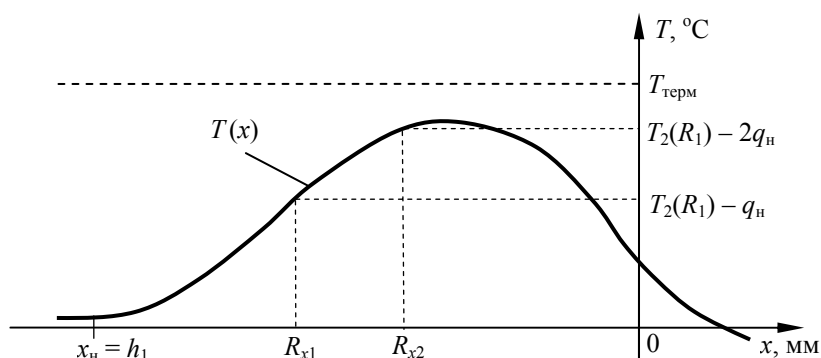


Рис. 2.6. Термограмма нагрева в зависимости от расстояния между точечным источником и термодатчиками

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

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



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

$$q_{\text{ит}} = q_{\text{па}} + q_{\text{отр}} + q_{\text{к}} + q_{\text{л}} + q, \quad (2.19)$$

где  $q_{\text{ит}}$  – мощность точечного источника тепла;  $q_{\text{па}}$  – потери тепловой мощности из-за поглощения окружающей средой части энергии излучения источника тепла;  $q_{\text{отр}}$  – потери тепловой мощности из-за неполного поглощения энергии излучения источника тепла поверхностью исследуемого объекта вследствие того, что исследуемый материал имеет коэффициент поглощения, отличающийся от единицы;  $q_{\text{к}}$  – потери тепловой мощности в окружающую среду за счет конвективного теплообмена;  $q_{\text{л}}$  – потери тепловой мощности в окружающую среду за счет лучистого теплообмена;  $q$  – мощность, распространяемая в исследуемом теле за счет кондуктивной теплопроводности.

Распишем подробнее слагаемые правой части уравнения (2.19). Потери тепловой мощности из-за поглощения окружающей средой части энергии излучения источника тепла [19]:

$$q_{\text{па}} = q_{\text{ит}} [1 - \exp(-\gamma l)] = q_{\text{ит}} [1 - \beta], \quad (2.20)$$

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

Потери тепловой мощности из-за неполного поглощения энергии лазерного луча поверхностью исследуемого непрозрачного тела с учетом потерь  $q_{\text{отр}}$  [20]

$$q_{\text{отр}} = r q_{\text{ит}} [1 - \beta] = (1 - \alpha) q_{\text{ит}} [1 - \beta], \quad (2.21)$$

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

Известно [20], что при заданной температуре коэффициент излучения  $\varepsilon$  (степень черноты) тела равен его коэффициенту поглощения  $\alpha$ , т.е.  $\varepsilon = \alpha$ . С учетом этого выражение (2.21) можно записать в следующем виде:

$$q_{\text{отр}} = (1 - \varepsilon) q_{\text{ит}} [1 - \beta]. \quad (2.22)$$

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

$$q_{\text{к}} = \bar{q}_{\text{к}} S = \alpha_{\text{к}} (T_{\text{п}} - T_{\text{с}}) S, \quad (2.23)$$

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

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

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

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

Мощность  $q$ , распространяемая в исследуемом теле за счет кондуктивной теплопроводности при бесконтактном тепловом воздействии на него от подвижного точечного источника тепла, перемещающегося со скоростью  $V$ , согласно выражению [18], определяется следующим уравнением:

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

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

Используя соотношения (2.20) – (2.25) для каждого из слагаемых выражения (2.19), можно после несложных математических преобразований получить распределение температуры в полубесконечном в тепловом отношении теле при действии на него подвижного точечного источника теплоты с учетом тепловых потерь с поверхности тела в окружающую среду в следующем виде [22, 23]:

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

На основании выражения (2.26) измеряемое значение избыточной предельной температуры в точке, перемещающейся вслед за источником по линии его движения и отстающей от него на расстоянии  $R_{\text{х1}}$ , будет определяться зависимостью

$$T_1(x) = \frac{\varepsilon \exp(-\gamma l) q_{\text{ит}}}{2\pi\lambda R_{x1} + (\alpha_{k1} + \alpha_{л1})S_1} = \frac{k q_{\text{ит}}}{2\pi\lambda R_{x1} + (\alpha_{k1} + \alpha_{л1})S_1}, \quad (2.27)$$

где  $R_{x1}$  – расстояние между центром пятна нагрева и точкой измерения температуры;  $\alpha_{k1}$  – коэффициент конвективного теплообмена при мощности источника тепла  $q_{\text{ит}}$ ;  $\alpha_{л1}$  – коэффициент лучистого теплообмена при мощности источника тепла  $q_{\text{ит}}$ ;  $S_1$  – площадь теплоотдающей поверхности при мощности источника тепла  $q_{\text{ит}}$ .

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

$$T_2(R_1) = \frac{k q_{\text{ит}}}{2\pi\lambda R_1 \exp\left(\frac{V(R_1 - x_1)}{2a}\right) + (\alpha_{k1} + \alpha_{л1})S_1}. \quad (2.28)$$

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

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

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

При этом значение контролируемой температуры будет определяться выражением:

$$T_1^*(x) = \frac{2k q_{\text{ит}}}{2\pi\lambda R_{x2} + (\alpha_{k2} + \alpha_{л2})S_2}, \quad (2.30)$$

где  $\alpha_{k2}$  – коэффициент конвективного теплообмена при мощности источника тепла  $2q_{\text{ит}}$ ;  $\alpha_{л2}$  – коэффициент лучистого теплообмена при мощности источника тепла  $2q_{\text{ит}}$ ;  $S_2$  – площадь теплоотдающей поверхности при мощности источника тепла  $2q_{\text{ит}}$ .

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

Граница температурного поля на поверхности исследуемого объекта представляет собой изотерму, имеющую форму эллипса (рис. 2.7). Таким образом, площадь теплоотдающей поверхности считается по формуле:  $S = \pi x_1 y_1$ , где  $x_1, y_1$  – радиусы граничной изотермы температурного поля. Из формулы (2.18) видно, что при увеличении мощности источника  $q_{\text{ит}}$  в  $n$  раз радиус эллипса  $x_1$  увеличивается также в  $n$  раз. При решении системы уравнений (2.25) и  $\partial T / \partial x = 0$  [24] радиус  $y_1$  увеличивается в  $\sqrt{n}$ . Таким образом, при увеличении мощности источника  $q_{\text{ит}}$  в  $n$  раз площадь теплоотдающей поверхности исследуемого объекта увеличивается в  $n\sqrt{n}$  ( $2\sqrt{2}$ ).

Проанализируем, как изменяются удельные тепловые потоки конвективного и лучистого теплообмена при увеличении мощности источника  $q_{\text{ит}}$  в  $n$  раз. Удельный тепловой поток конвективного теплообмена  $\bar{q}_{k1}$  при мощности источника тепла  $q_{\text{ит}}$  [21]

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

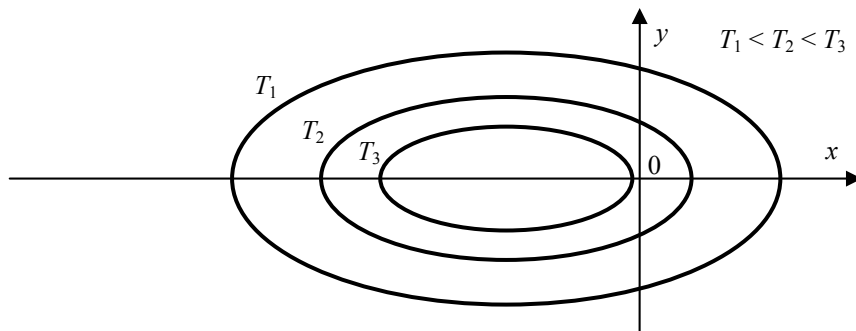


Рис. 2.7. Изотермы температурного поля на поверхности исследуемого объекта

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

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

находится в пределах (1,69...1,4) [21], то можно принять  $A = \text{const}$ . С учетом этого удельный тепловой поток конвективного теплообмена  $\bar{q}_{к2}$  при мощности источника тепла  $nq_{ит}$

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

Аналогично удельный тепловой поток лучистого теплообмена  $\bar{q}_{л1}$  при мощности источника тепла  $q_{ит}$  [21]

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

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

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

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

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

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

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

Можно показать [25], что сигнал  $u$  с термодатчика определяется следующим выражением:

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

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

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

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

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

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

$$\lambda = \frac{kq_{ит}(\sqrt{2}-1)}{\pi T_1^*(x)[2\sqrt{2}R_{x1} - R_{x2}]}. \quad (2.37)$$

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

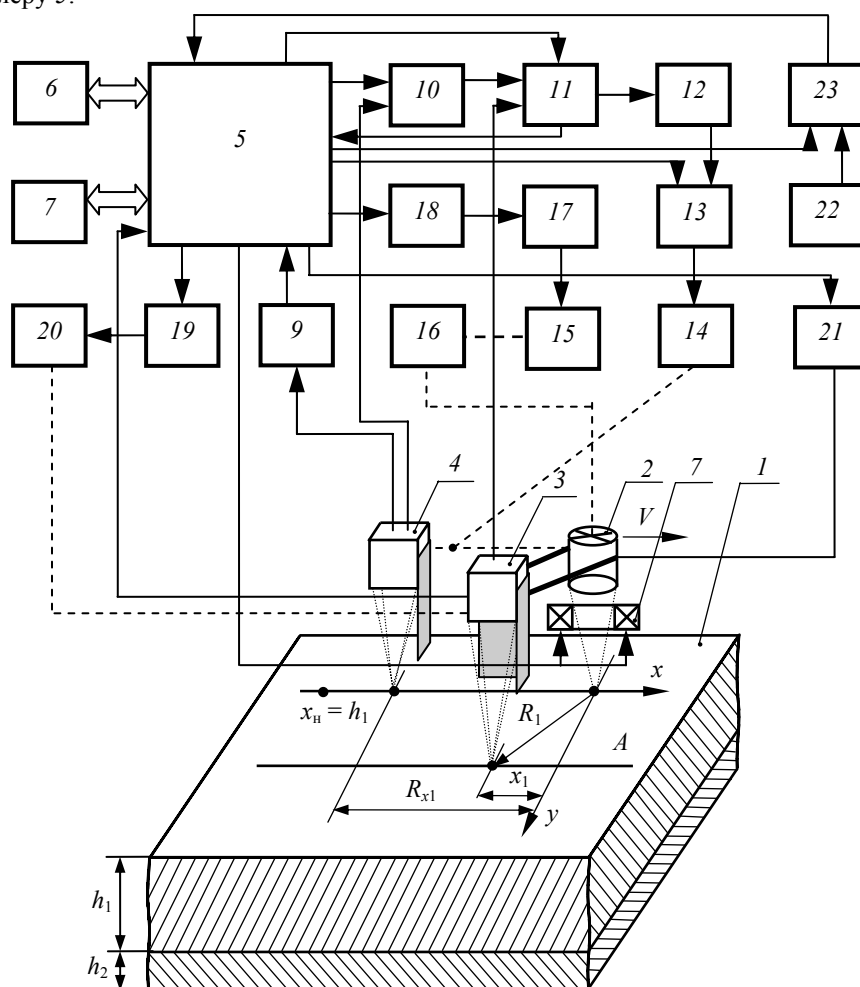
Особенностью разработанного метода [26] является то, что в нем, в отличие от известных методов, определяется коэффициент  $k$ , учитывающий значения степени черноты  $\varepsilon$  поверхности исследуемого образца и прозрачности  $\beta$  окружающей среды. Кроме того, более точно учитываются изменения величин тепловых потерь с поверхности исследуемого объекта в окружающую среду при изменении мощности источника тепла в два раза. Это позволяет почти полностью устранить их влияние на результаты измерений, что в итоге существенно повышает метрологический уровень разработанного метода. Предложенный метод позволяет практически полностью исключить влияние коэффициента излучения  $\varepsilon$  на результаты измерений, так как в нем используется отношение сигналов с двух термодатчиков и по условиям измерений  $T_1(x) = T_2$ , т.е. на результаты измерений практически не влияет значение коэффициента излучения  $\varepsilon$  и его зависимость от температуры. Погрешность измерения температуры в большей степени влияет на вычисление теплопроводности  $a$ , чем погрешность измерения расстояния  $R_x$ , так как значение этого расстояния на три порядка меньше значения измеряемых температур, а так как в предложенном способе  $T_1(x) / T_2 = 1$ , то значение коэффициента теплопроводности  $a$  практически не зависит от

погрешности термодатчиков, что также уменьшает погрешность его определения. Использование измерительного зонда (второго термодатчика), в сравнении с известными методами, позволяет сократить число проводимых измерительных процедур, что приводит к уменьшению времени определения теплофизических свойств материалов.

На рис. 2.8 приведена схема микропроцессорной ИИС [27, 28], реализующей описанный выше бесконтактный метод НК ТФС двухслойных строительных конструкций. В схеме над исследуемым двухслойным изделием *1* вначале с одной стороны помещают точечный источник тепловой энергии *2* и два термодатчика *3* и *4*, сфокусированных на поверхность, подверженную тепловому воздействию.

Основным блоком разработанной ИИС является микропроцессорный контроллер *5* с цифровым индикатором *6* и клавиатурой *7*. К микропроцессорному контроллеру *5* через его порты (адаптеры ввода-вывода) подключены также оптический затвор *8* источника тепла, датчик положения *9* термодатчика *4* относительно точечного источника тепла *2*, управляющий вход электронного ключа *10*, информационный вход которого подключен к выходу термодатчика *4*, а выход ключа соединен с первым входом вычитающего устройства *11*. Второй вход вычитающего устройства *11* соединен с выходом термодатчика *3*, а выход вычитающего устройства через усилитель мощности *12* подключен к цепи питания реверсивным двигателем *13*, выход которого в свою очередь соединен с механизмом перемещения *14* термодатчика *4* относительно теплового источника *2* по оси *x*. Перемещение всего информационного зонда ИИС, включающей точечный источник тепла *2* и термодатчики *3*, *4*, над поверхностью исследуемых изделий с заданной скоростью *V* осуществляется двигателем постоянного тока *15* через механизм перемещения *16*, который кинематически связан с измерительным зондом. Управление работой двигателя *15* осуществляется микропроцессорным контроллером *5* через блок питания *17* и блок управления двигателем *18*. Фокусировка термодатчика в центр пятна нагрева источника тепла *2* осуществляется устройством управления фокусировкой *19*, которая через механизм фокусировки *20* изменяет положение термодатчика *3* относительно поверхности контролируемого изделия.

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



**Рис. 2.8. Схема ИИС бесконтактного НК ТФС двухслойных строительных конструкций с коррекцией влияния степени черноты исследуемых объектов на результаты измерений**

Работа измерительной системы осуществляется следующим образом. Вначале ИИС с клавиатуры *7* приводится в исходное состояние, при котором электронный ключ *10* закрыт, источник питания *21* лазера и источник питания *17* двигателя *15* перемещения измерительного зонда системы выключены. Затем по команде с микропроцессорного контроллера *5* блок управления *19* через механизм *20* фокусирует термодатчик *4* в центр пятна нагрева лазера *2*, а термодатчик *3* перемещается по оси *x* на расстояние  $x_n = h_1$  от источника тепла реверсивным двигателем *13*, который управляется микропроцес-

сорным контроллером через блок 18, перемещая в нужную сторону термодатчик 4 в зависимости от информации с датчика 9 о местоположении этого термодатчика. Сигнал управления вырабатывается микропроцессорным контроллером 5 по соответствующей подпрограмме, использующей соотношение (2.17) и реализующей алгоритм  $h_1 - x_n = 0$ . Далее по команде с микропроцессорного контроллера 5 включают блок питания 17 двигателя постоянного тока 15 и, изменяя блоком 18 величину напряжения питания двигателя, устанавливают заданную в микропроцессорном контроллере скорость перемещения  $V$  измерительного зонда ИИС над исследуемым изделием. Одновременно с этим с помощью электрического термометра 22 измеряют температуру окружающей среды и термодатчиком 4 температуру поверхности исследуемых изделий. Полученную информацию заносят в ОЗУ микропроцессорного контроллера 5. Затем включают лазерный источник на найденную ранее мощность  $q_n$  и начинают пошаговое перемещение термодатчика 4 по оси  $x$  в сторону приближения к пятну нагрева источника 2. На первом шаге, который устанавливается с помощью датчика 19 и берется равным  $0,2 \dots 0,5$  мм, информация с термодатчика 4 через открытый микропроцессорным контроллером ключ 10 поступает на первый вход вычитающего устройства 11, на второй вход которого подается информация с термодатчика 3, фиксирующего температуру  $T_2$  на расстоянии  $R_2$  от источника тепла. Информация о разности  $\Delta T_i = T_2(R_1) - T(x_i)$  с выхода блока 11 поступает в микропроцессорный контроллер 5, а также на усилитель мощности 12, сигнал с которого поступает на реверсивный двигатель 13 и через механизм 14 перемещает термодатчик 4 на следующий шаг  $\Delta x_i$ . Изменение расстояний между термодатчиком 4 и источником тепла 2 осуществляют до тех пор, пока измеряемая избыточная температура  $T_1(x)$  станет равной значению измеряемой температуры  $T_2$ , т.е.  $T_1(x) = T_2(R)$ . При этом измеряют датчиком 9 значение расстояния  $R_{x1}$  между термодатчиком 4 и точкой подвода теплоты. Затем по команде с микропроцессорного контроллера 5 увеличивается мощность источника 21 питания лазера в два раза и повторяется по вышеописанному алгоритму работа соответствующих блоков ИИС. В результате измеряют значение расстояния  $R_{x2}$ , при котором выполняется вышеуказанное соотношение контролируемых избыточных температур, а искомые ТФС определяют в микропроцессорном контроллере по программам, построенным на основании соотношений (2.29) и (2.37). Полученные значения ТФС контролируемого слоя хранятся в ПЗУ микропроцессорного контроллера 5 и могут быть вызваны в любое время после окончания теплофизического эксперимента на цифровой индикатор 6 оператором с клавиатуры 7.

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

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

Поскольку в бесконтактных методах и системах НК ТФС материалов и изделий тепловое воздействие и получение измерительной информации о температурных полях осуществляются с поверхности исследуемых объектов, не теплоизолированных от окружающей среды, то на результаты измерения существенное влияние оказывают тепловые потери в эту среду. Далее рассмотрим адаптивный метод НК ТФС двухслойных изделий, сущность которого заключается в следующем [3, 29]. Над исследуемым изделием 1 помещают точечный источник тепловой энергии 2 и два термодатчика 3 и 4, сфокусированных на поверхность, подверженную тепловому воздействию (рис. 2.9). Перемещение термодатчика 3 осуществляется по оси  $x$ , а термодатчика 4 – по параллельной ей прямой  $A$ . Регулирование величины теплового воздействия на поверхность исследуемого образца осуществляется оптическим затвором 5, который осуществляет частотно-импульсную модуляцию лазерного луча.

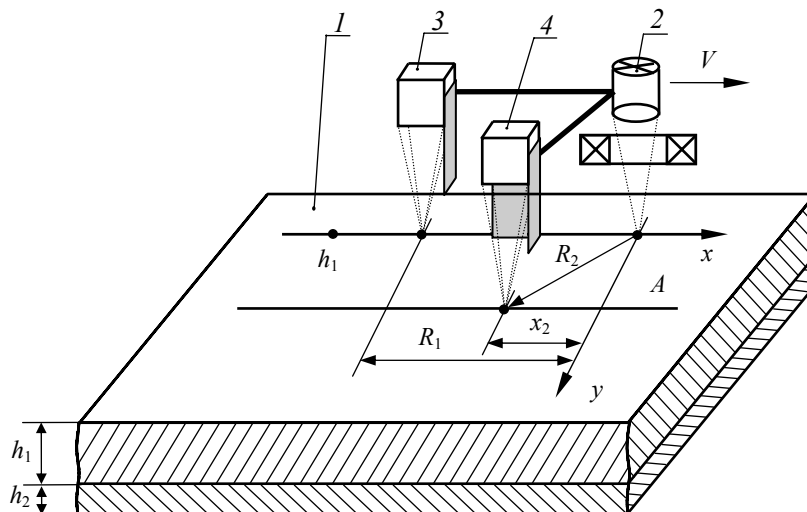


Рис. 2.9. Схема расположения точечного источника тепла и термодатчиков в адаптивном по мощности тепловому воздействию

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

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

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

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

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

где  $T_{\text{зад}}$  – заданное значение избыточной температуры, величина которой задается не выше 20 % от температуры термодеструкции  $T_{\text{терм}}$  исследуемого материала;  $T_{R1}(F_i)$  – значение избыточной температуры в точке контроля, расположенной на расстоянии  $R_1$  от центра пятна нагрева;  $k_1, k_2, k_3$  – коэффициенты пропорциональности, устанавливаемые перед экспериментом в зависимости от диапазона ТФС исследуемых материалов и времени проведения эксперимента.

Изменение частоты  $F$  подачи тепловых импульсов от источника тепла осуществляют до тех пор, пока измеряемая в точке контроля  $R_1$  избыточная температура  $T_{R1}(F_i)$  станет равной заданному значению температуры  $T_{\text{зад}}$ . При этом измеряют значение частоты  $F_1$  и значение избыточной температуры  $T(R_2)$  в точке контроля, расположенной на расстоянии  $R_2$  от центра пятна нагрева. Затем, увеличив заданное значение избыточной температуры  $T_{\text{зад}}$  в два раза, повторяют вышеописанные процедуры измерения. В результате определяют значение параметра  $F_2$ , при котором выполняется вышеуказанное соотношение контролируемых избыточных температур, а искомые ТФС определяют по зависимостям, полученным на основании следующих рассуждений.

На основании выражения (2.26), полученного в параграфе 2.2, измеряемое значение избыточной предельной температуры в точке, перемещающейся вслед за источником тепла по линии его движения и отстающей от него на расстоянии  $R_1$  при частоте следования его тепловых импульсов  $F_1$ , будет определяться следующей зависимостью:

$$T_{F1}(R_1) = \frac{\varepsilon \exp(-\gamma l) q_{\text{ит}}}{2\pi\lambda R_1 + (\alpha_{\text{к1}} + \alpha_{\text{л1}})S_1} = \frac{k F_1 \tau_{\text{имп}} q_{\text{ит}}}{2\pi\lambda R_1 + (\alpha_{\text{к1}} + \alpha_{\text{л1}})S_1}, \quad (2.39)$$

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

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

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

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

Так как из условия эксперимента  $T_{F1}(R_1) = T_{\text{зад}}$ , то после несложных математических преобразований выражений (2.39) и (2.40) получим формулу для расчета температуропроводности в следующем виде:

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

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

$$T_{F_2}(R_2) = \frac{k F_2 \tau_{\text{имп}} q_{\text{ит}}}{2\pi\lambda R_1 + (\alpha_{\kappa 2} + \alpha_{\lambda 2}) S_2} = \frac{k n F_1 \tau_{\text{имп}} q_{\text{ит}}}{2\pi\lambda R_1 + (\alpha_{\kappa 2} + \alpha_{\lambda 2}) S_2}, \quad (2.42)$$

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

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

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

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

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

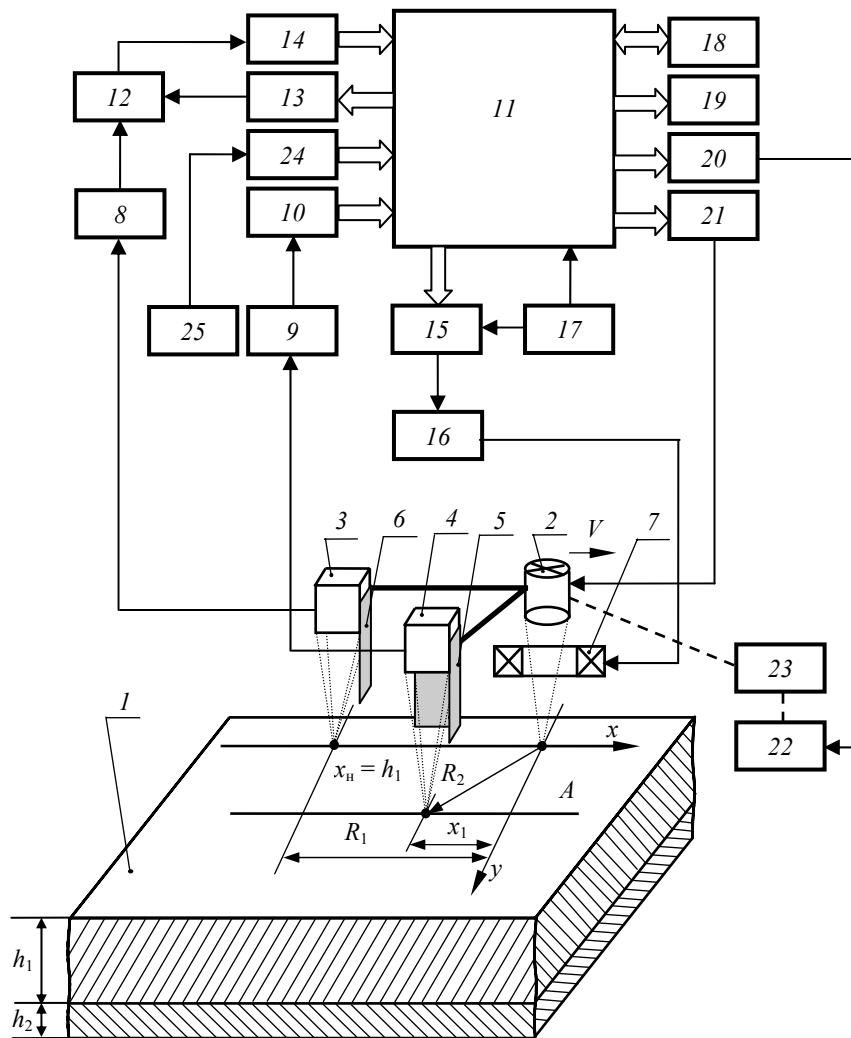
$$\lambda = \frac{k F_2 \tau_{\text{имп}} q_{\text{ит}} (\sqrt{F_2/F_1} - 1)}{2\pi R_1 T_{\text{зад}} [(F_2/F_1)^{3/2} - 2]}. \quad (2.44)$$

Таким образом, определив коэффициент  $k$  по соотношению (2.36), измерив частоты  $F_1$  и  $F_2$  следования тепловых импульсов и избыточную температуру  $T(R_2)$ , зная длительность  $\tau_{\text{имп}}$  одного теплового импульса и мощность  $q_{\text{ит}}$  источника тепла, а также скорость его движения над поверхностью исследуемого тела, по формулам (2.41) и (2.44) можно определить искомые ТФС исследуемого слоя двухслойной системы. Для определения ТФС второго слоя исследуемого двухслойного изделия источник тепла и термоприемники фокусируют на поверхность второго слоя изделия и производят вышеописанные процедуры измерения.

Отличительной особенностью разработанного метода является то, что в нем, в отличие от известных бесконтактных методов, термоприемник вначале размещается над образцом без воздействия на него точечного источника энергии (лазера). В результате этого определяется коэффициент  $k$ , учитывающий значения степени черноты  $\epsilon$  поверхности исследуемого образца и прозрачности  $\beta$  окружающей среды, разделяющей поверхность исследуемого образца и измерительный зонд. Введение коэффициента  $k$  в расчетных формулах позволяет практически полностью исключить влияние на результаты измерений тепловых потерь с поверхности исследуемых объектов в окружающую среду, величина которых для большинства материалов, как показали эксперименты, составляет не менее 20 % мощности источника тепла [30]. Кроме того, в расчетной формуле для определения теплопроводности вводится поправка, более точно учитывающая изменения величин тепловых потерь с поверхности исследуемого объекта в окружающую среду при изменении мощности источника тепла в  $n$  раз. Это также позволяет устранить влияние на результаты измерений тепловых потерь с поверхности исследуемых объектов в окружающую среду, что в итоге существенно повышает метрологический уровень разработанного метода.

На рис. 2.10 приведена схема ИИС, реализующая разработанный метод бесконтактного НК ТФС многослойных изделий [30].

Над исследуемым изделием 1 помещают точечный источник тепловой энергии 2 и два термоприемника 3 и 4, сфокусированных на поверхность, подверженную тепловому воздействию. Регулирование величины теплового воздействия на поверхность исследуемого образца осуществляется оптическим затвором 7, который осуществляет частотно-импульсную модуляцию лазерного луча. Термоприемники 3 и 4 подключены к входам соответственно усилителей 8 и 9. Выход усилителя 9 соединен с входом первого аналогово-цифрового преобразователя (АЦП) 10, выход которого в



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

свою очередь подключен к первому входу микропроцессорного контроллера 11. Выход усилителя 8 соединен с первым входом вычитающего устройства 12, второй вход которого подключен к выходу цифро-аналогового преобразователя (ЦАП) 13, вход которого соединен с первым выходом микропроцессорного контроллера 11. Выход вычитающего устройства подключен к входу второго АЦП 14, выход которого соединен со вторым входом микропроцессорного контроллера 11. Второй выход микропроцессорного контроллера 11 подключен к первому входу управляемого делителя частоты 15, выход которого соединен с входом блока управления оптическим затвором 16, выход которого в свою очередь подключен к оптическому затвору 7. Второй вход управляемого делителя частоты 15 соединен с выходом генератора тактовых импульсов 17, подключенного также к контроллеру 11. Остальные выходы микропроцессорного контроллера 11 соединены с входами клавиатуры 18, индикатора 19, блока управления приводом 20 и с управляющим входом блока питания 21, выход которого соединен с источником энергии 2.

Выход блока управления приводом 20 подключен к реверсивному двигателю 22, вал которого кинематически соединен с механизмом перемещения 23 источника энергии 2 и термоприемников 3, 4 относительно исследуемого изделия 1. Третий вход микропроцессорного контроллера 11 подключен к выходу третьего АЦП 24, вход которого в свою очередь соединен с выходом электрического термометра 25.

ИИС реализует разработанный бесконтактный метод НК ТФС двухслойных изделий следующим образом [31]. Запуск устройства осуществляется оператором подачей с клавиатуры 18 команды на включение реверсивного двигателя 22, который через механизм перемещения 23 перемещает источник энергии 2 и термоприемники 3, 4 (измерительный зонд) относительно исследуемого изделия 1. Информация о температуре на поверхности исследуемого изделия измеряется термоприемником 3 и через усилитель 9 и АЦП 10 записывается в оперативную память микропроцессорного контроллера 11. Синхронно с этим, электрическим термометром 25 измеряется температура окружающей среды, информация о которой через АЦП 24 также записывается в оперативную память микропроцессорного контроллера 11. В результате этого, используя отношение средней температуры, измеренной термоприемником на поверхности объекта, к средней температуре окружающей среды, в микропроцессорном контроллере 11 рассчитывается и сохраняется в его оперативной памяти значение коэффициента  $k$ , равного произведению коэффициентов степени черноты  $\epsilon$  поверхности исследуемого образца и прозрачности  $\beta$  окружающей среды, разделяющей поверхность исследуемого образца и измерительный зонд. Далее микропроцессорный контроллер 11 дает команду на включение блока питания 21 источника энергии 2. Информация о температуре поверхности исследуемого изделия в точке контроля  $R_1$  измеряется термоприемником 3 и через усилитель 8 поступает на первый вход вычитающего устройства 12, на второй вход которого через ЦАП 13 с микропроцессорного контроллера 11 подается напряжение, пропор-



циональное заданному значению температуры  $T_{\text{зад}}$ . Разностный сигнал с вычитающего устройства 12 через АЦП 14 поступает в микропроцессорный контроллер 11, который в соответствии с величиной этого сигнала и зависимостью (2.38) вычисляет значение кода, который подается на управляемый делитель частоты 15, и определяет коэффициент деления опорной частоты, подаваемой с генератора тактовых импульсов 17. Результирующая частота подается на блок управления 16 оптическим затвором 7, осуществляющего частотно-импульсную модуляцию лазерного луча. Изменение частоты  $F$  подачи тепловых импульсов от источника тепла осуществляется в соответствии с алгоритмом (2.38) до тех пор, пока измеряемая в точке контроля  $R_1$  избыточная температура не станет равной заданному значению температуры  $T_{\text{зад}}$ , т.е. на выходе вычитающего устройства 12 при этом отсутствует сигнал. При этом термоприемник 4 в точке контроля  $R_2$  измеряет избыточную температуру  $T(R_2)$  и информация о ней через усилитель 9 и АЦП 10 записывается в оперативную память микропроцессорного контроллера 11. Туда же записывается вычисленное микропроцессорным контроллером 11 значение установившейся частоты  $F_1$ . Затем микропроцессорный контроллер 11 через ЦАП 13 подает на первый вход вычитающего устройства 12 напряжение, пропорциональное удвоенному значению заданной температуры  $T_{\text{зад}}$ , и изменяет частоту  $F$  подачи тепловых импульсов от источника тепла в соответствии с алгоритмом, реализующем зависимость (2.38), до тех пор, пока измеряемая в точке контроля  $R_1$  избыточная температура не станет равной удвоенному значению заданной температуры  $2T_{\text{зад}}$ . При этом в оперативную память микропроцессорного контроллера 11 записывается вычисленное им значение установившейся частоты  $F_2$ .

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

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

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

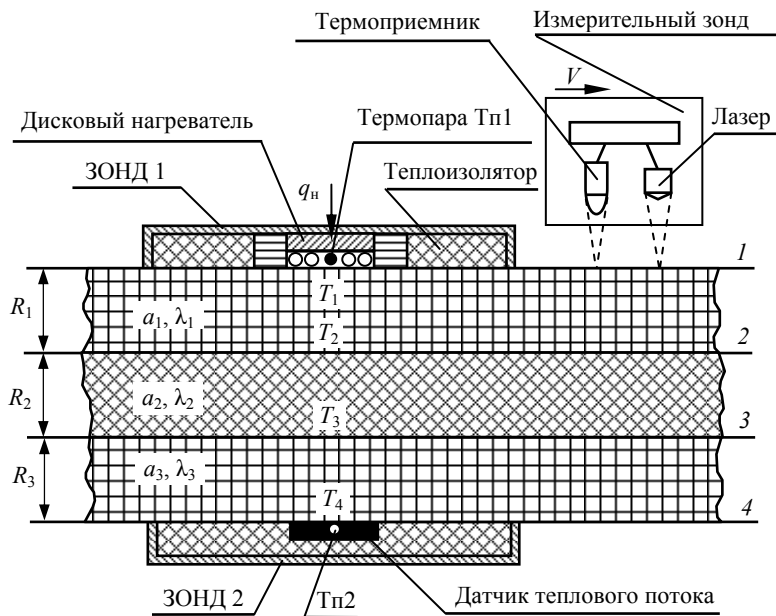
Проведенная экспериментальная проверка разработанной ИИС показала, что предложенное техническое решение по сравнению с известными устройствами позволило на 8 – 12 % повысить точность результатов измерения.

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

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

Разработан комбинированный метод НК ТФС трехслойных строительных конструкций, сущность которого состоит в следующем [32, 33]. На каждую из наружных поверхностей многослойной конструкции (рис. 2.11) устанавливаются по одному зонду, в плоскости контакта первого из которых расположены дисковый нагреватель ДН, а также термopара Тп1, помещенная в центр контактной плоскости дискового нагревателя.

В плоскости контакта второго термозонда расположены датчик теплового потока Тq, а в центре круга датчика теплового потока вмонтирована вторая термopара Тп2. Дополнительно устанавливаются над наружной поверхностью точечный источник тепловой энергии (лазер) и термоприемник, сфокусированный на поверхность, подверженную тепловому воздействию, и регистрирующий температуру этой поверхности по ее электромагнитному излучению.

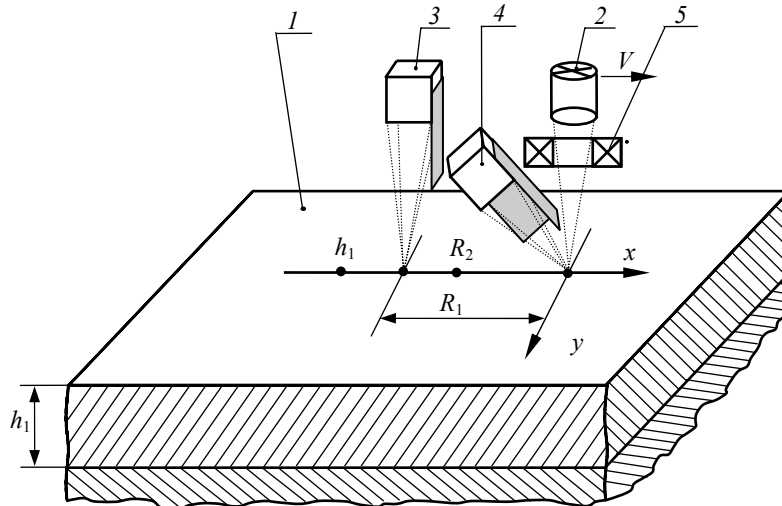


**Рис. 2.11. Схема расположения источников и термодатчиков в комбинированном методе НК ТФС трехслойных строительных конструкций**

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

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

Первоначально, как и в методах НК ТФС многослойных строительных конструкций, изложенных в разделах 2.2 и 2.3 этой работы, измерительный зонд перемещают над исследуемым объектом без теплового воздействия от источника тепла, контролируют температуру поверхности исследуемого изделия и синхронно с этим измеряют температуру окружающей среды. По полученным данным об этих температурах определяют коэффициент  $k$ , зависящий от степени черноты  $\epsilon$  поверхности исследуемых образцов и прозрачности  $\beta$  окружающей среды, разделяющей поверхность



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

исследуемых объектов и термодатчики, а затем используют найденное значение  $k$  для введения поправок при расчете искомого ТФС на эти дестабилизирующие факторы. Далее термодатчик фокусируют в точку поверхности первого наружного слоя исследуемого объекта, находящуюся на расстоянии  $x = h_1$  от центра пятна нагрева лазера и начинают перемещение источника энергии и термодатчика (измерительного зонда, см. рис. 2.11) над исследуемым изделием со скоростью  $V$ . При этом осуществляют широтно-импульсную модуляцию лазерного луча, прерывая его фотозатвором 5 и изменяя при этом мощность тепловых импульсов, наносимых на поверхность исследуемого тела. Увеличение мощности тепловых импульсов  $Q_i$  осуществляют до тех пор, пока в точке поверхности  $x = h_1$  появится избыточная температура, равная  $0,1 \dots 0,2$  К. При этом термодатчик 4 фокусируют в центр пятна нагрева источника и измеряют в паузах между тепловыми импульсами избыточную температуру поверхности слоя, исключая тем самым прямое попадание отраженного от поверхности луча лазера в инфракрасный первичный преобразователь температуры 5.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

$\tau_0$  – минимальный интервал времени определения разности  $\Delta T_i$ , который задается в диапазоне от 1 до 3 с;  $K_2, K_3, K_4$  – коэффициенты пропорциональности, причем  $K_2$  задается в диапазоне от 0,2 до 5,  $K_3$  – от 10 до 50,  $K_4$  – от 0,1 до 5; для материалов с большой теплопроводностью значение  $K_4$  целесообразно брать  $>1$ , а для теплоизоляторов –  $<1$ , так как в первом случае термограмма нагрева изменяется динамичнее и для определения равенства установившейся температуры заданному значению необходимо чаще определять  $\Delta T_i$ . Определяют такую мощность импульсов  $Q_{x1}$ , при которой установившееся значение избыточной температуры в точке контроля станет равным наперед заданному значению  $T_{\text{зад1}}$  (рис. 2.13, б).

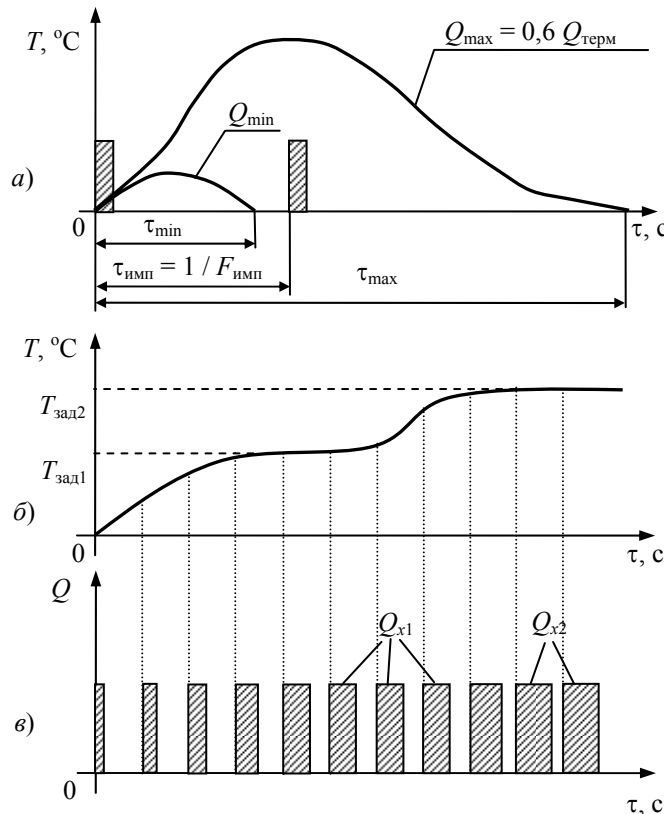


Рис. 2.13. Термограммы нагрева и вид теплового воздействия

**при адаптивном изменении мощности тепловых импульсов,  
воздействующих на объект**

Затем еще увеличивают мощность тепловых импульсов в соответствии с зависимостью (2.47) до тех пор, пока установившееся значение избыточной температуры в точке контроля станет равным второму наперед заданному значению  $T_{зад 2}$ , которое на 10 – 15 % превышает значение  $T_{зад 1}$ , и определяют мощность тепловых импульсов  $Q_{x2}$  (рис. 2.13, в). Определяют интервалы времени  $\tau_{рел 1}$  и  $\tau_{рел 2}$  от начала теплового воздействия, соответственно, одиночными тепловыми импульсами мощностью  $Q_{x1}$  и  $Q_{x2}$  до момента, когда температура в точке контроля станет равной ее первоначальному значению. По найденным значениям мощностей  $Q_{x1}$  и  $Q_{x2}$ , интервалам времени тепловой реакции системы на импульсы этой мощности  $\tau_{рел 1}$  и  $\tau_{рел 2}$  рассчитываются искомые теплофизические характеристики исследуемого материала по формулам, полученным на основании следующих рассуждений.

Известно [18], что уравнение квазистационарного состояния процесса распространения теплоты точечного источника постоянной мощности  $q$ , движущегося с постоянной скоростью  $V$  над поверхностью полубесконечного в тепловом отношении тела, имеет следующий вид:

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

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

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

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

где  $F_{имп}$  – частота тепловых импульсов от источника тепла;  $Q_{x1}$ ,  $Q_{x2}$  – мощности тепловых импульсов источника тепла, соответственно при контроле избыточных температур в точках поверхности на расстоянии  $R_1$  и  $R_2$  от пятна источника тепла.

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

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

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

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

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

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

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

Для определения ТФС материалов внутреннего слоя конструкции включают дисковый нагреватель ДН и осуществляют подвод к поверхности конструкции удельного теплового потока через круг до тех пор, пока на противоположной поверхности конструкции появится тепловой поток. Измеряют при этом величину установившегося теплового потока  $Q_{x3}$ , а также температуру в плоскостях 1 и 4 (рис. 2.11) с помощью термодатчиков Тп1 и Тп2.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Для определения коэффициента температуропроводности внутреннего слоя конструкции применяем аналитическое решение [14], описывающее распределение температуры по толщине  $R_2$  слоя материала и во времени  $\tau$  при использовании модели полупространства и имеющее вид:

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

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

Таким образом, имея информацию о мощности и частоте тепловых импульсов точечного линейного источника тепла (лазера) и измерив температуру в заданных точках поверхности исследуемого изделия, по соотношениям (2.53) и (2.54) определяем ТФС наружных слоев строительной конструкции, а измерив тепловой поток на противоположной от дискового нагревателя стороне изделия и температуры на обеих внешних сторонах конструкции при действии дискового нагревателя, по соотношениям (2.59) и (2.60) определяют ТФС внутреннего слоя строительной конструкции.

Основным преимуществом разработанного метода по сравнению с известными является повышение оперативности контроля трехслойных изделий за счет использования комбинации контактного и бесконтактного тепловых воздействий на исследуемый объект. Оперативность контроля обусловлена тем, что при определении ТФС наружных слоев трехслойного изделия используется бесконтактный метод измерения параметров теплофизического эксперимента [34]. Кроме того, при бесконтактном определении ТФС наружных слоев изделий исключается из результатов измерений погрешность от влияния контактных термосопротивлений, величина которых, как показывает практика теплофизических измерений, составляет не менее 15 – 25 %, носит случайный характер, зависит от многих параметров контактирующих тел, поэтому практически не может быть учтена путем введения поправок или коррекцией результатов измерений. Сканирование над большими участками исследуемых наружных слоев измерительным зондом, состоящем из лазерного источника тепла и термоприемника, позволяет получить значительно большее чем в известных методах количество информации об объекте исследования, что существенно повышает достоверность и точность результатов измерения искомых ТФС.

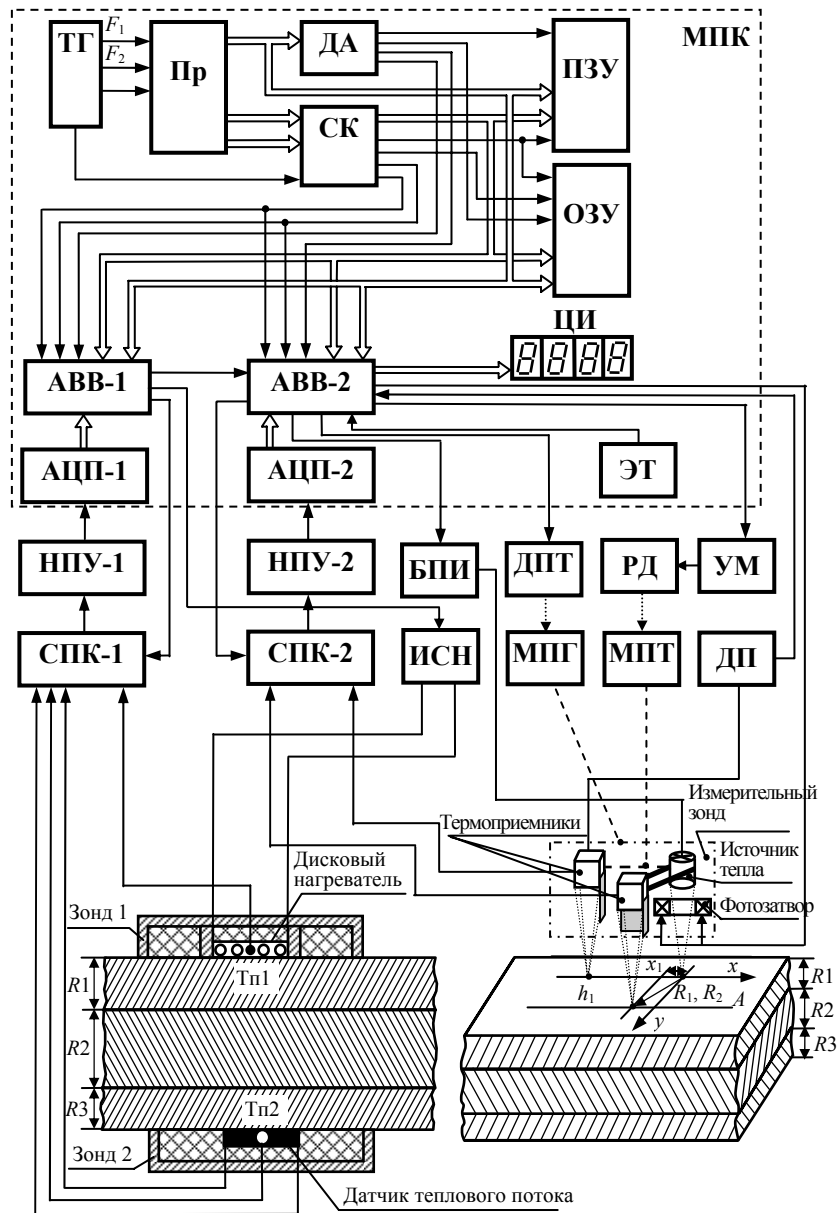
Существенным преимуществом разработанного комбинированного метода НК ТФС трехслойных изделий является использование адаптивных процедур при оптимизации энергетических параметров теплофизического эксперимента [35], что, во-первых, исключает возможность разрушения исследуемых объектов из-за нагрева их до температур плавления, горения и т.д., во-вторых, повышает точность и достоверность искомых ТФС.

Для реализации разработанного комбинированного метода НК ТФС трехслойных изделий разработана микропроцессорная ИИС [36], схема которой представлена на рис. 2.14. Основным блоком разработанной ИИС является микропроцессорный контроллер МПК, включающий в себя системный контроллер СК, процессор Пр, постоянное запоминающее устройство ПЗУ, оперативное запоминающее устройство ОЗУ, дешифратор адресов ДА, адаптеры ввода-вывода АВВ-1, АВВ-2, аналого-цифровые преобразователи АЦП-1, АЦП-2, цифровой индикатор ЦИ и тактирующий генератор ТГ.

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

На контактной поверхности зонда 1 находится дисковый нагреватель, в центре которого зачеканена термопара Тп1, на контактной поверхности зонда 2 помещен датчик теплового потока и термопара Тп2. Выходы термопар Тп1 и Тп2, а также выход датчика теплового потока через специализированный прецизионный коммутатор СПК-1 и нормирующий прецизионный усилитель НПУ-2 подключены к АЦП-1, выход которого соединен с адаптером ввода-вывода АВВ-1. Дисковый нагреватель подключен к источнику стабилизированного напряжения ИСН, который управляется сигналом с адаптера ввода-вывода АВВ-1. Кроме того, к адаптеру АВВ-1 подключен электрический термометр ЭТ, контролирующей температуру окружающей среды.

Измерительный зонд, состоящий из точечного источника тепловой энергии (лазера) и двух термоприемников, один из которых сфокусирован на линию движения источника тепла  $x$ , а другой – на линию  $A$ , параллельную линии  $x$ . Выходы термоприемников через специальный прецизионный коммутатор СПК-2 и нормирующий прецизионный усилитель НПУ-2 подключены к АЦП-2, выход которого соединен с адаптером ввода-вывода АВВ-2. Точечный источник тепла (лазер) соединен с блоком питания БПЛ, который управляется микропроцессорным контроллером МПК через устройство ввода-вывода АВВ-2. Перемещение измерительного зонда с заданной постоянной скоростью  $V$  осуществляется механизмом МПГ, который приводится в движение двигателем постоянного тока ДПТ, управляемого через адаптер АВВ-2 МПК. Механизм перемещения термоприемника МПТ, осуществляющий через кинематическую связь изменение расстояния между источником тепла и термоприемниками, соединен с реверсивным двигателем РД, который через усилитель мощности УМ подключен к адаптеру АВВ-2 микропроцессорного контроллера МПК. Датчик ДП перемещения термоприемника относительно источника тепла соединен с устройством ввода-вывода АВВ-2, к которому подключен также фотозатвор.



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

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

Работа системы осуществляется следующим образом. По команде с микропроцессорного контроллера МПК включается дисковый нагреватель зонда 1 и снимается измерительная информация с термопар  $T_{п1}$  и  $T_{п2}$ , а также датчика теплового потока. Одновременно с этим по команде с микропроцессорного контроллера МПК снимается с электрического термометра ЭТ информация о температуре окружающей среды, а также с термоприемника информация о температуре поверхности исследуемого изделия. На основе этой измерительной информации в микропроцессорном контроллере МПК вычисляется коэффициент  $k$ , используемый для введения поправок при расчете искомых ТФС многослойных изделий. Далее по команде с микропроцессорного контроллера МПК термоприемник 1 устанавливается на расстоянии  $x = h_1$  от центра пятна нагрева лазера, включается блок питания лазера и механизм МПП начинает перемещать измерительный зонд над поверхностью первого наружного слоя с заданной скоростью  $V$ . При этом с микропроцессорного контроллера МПК в соответствии с алгоритмом, построенным с использованием соотношений (2.38), осуществляется широтно-импульсная модуляция лазерного луча прерыванием фотозатвора.



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

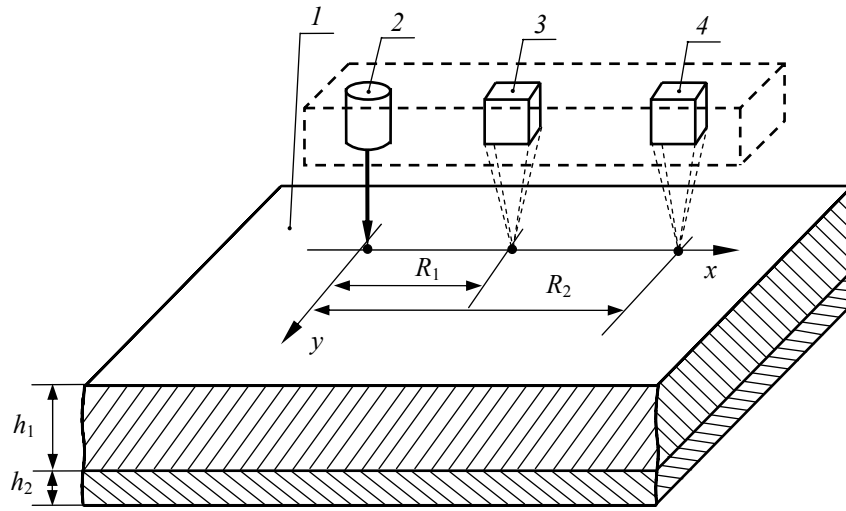
Увеличение мощности тепловых импульсов прекращается при появлении избыточной температуры в точке  $x = h_1$ , которая контролируется термодатчиком 1. Найденный верхний предел мощности  $Q_{\max}$ , при котором внутренний слой исследуемого изделия практически не будет оказывать влияние на результаты при контроле ТФС наружных слоев, заносится в оперативную память микропроцессорного контроллера МПК. Затем по команде с микропроцессорного контроллера термодатчик 1 помещается в точку на расстоянии  $R_1$  от термодатчика и мощность тепловых импульсов увеличивается с минимального значения  $Q_{\min}$  в соответствии с алгоритмом, реализующим соотношения (2.45 – 2.48), до момента времени, когда контролируемая избыточная температура станет равной наперед заданному значению  $T_{\text{зад}1}$ . Далее перемещают точку контроля температуры на расстояние  $R_2$ , равное, например, половине расстояния  $R_1$  и изменяют по тому же адаптивному алгоритму мощность тепловых импульсов до тех пор, пока контролируемая избыточная температура не станет равной заданному значению  $T_{\text{зад}2}$ . При этом в ОЗУ микропроцессорного контроллера МПК зафиксированы найденные мощности  $Q_{x1}$ ,  $Q_{x2}$  и  $F_{\text{имп}}$ , по которым в соответствии с зависимостями (2.52), (2.54) рассчитываются искомые ТФС первого наружного слоя. Затем по команде с микропроцессорного контроллера МПК аналогичные измерительные процедуры производятся при сканировании измерительным зондом над вторым наружным слоем трехслойного изделия и определяются ТФС нижнего наружного слоя изделия.

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

## **2.5. МЕТОД И СИСТЕМА БЕСКОНТАКТНОГО НК ТФС ДВУХСЛОЙНЫХ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ С НЕПОДВИЖНЫМ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫМ ЗОНДОМ**

Особенностью всех методов НК ТФС материалов, использующих подвижный измерительный зонд (источник излучения в совокупности с термодатчиками), является то, что в процессе измерений при его движении над поверхностью образца происходит изменение свойств исследуемого объекта (шероховатости, степени черноты) в зависимости от местоположения пятна нагрева, обусловленное тем, что свойства поверхности материала, как правило, не являются однородными по всей его площади. Таким образом, данная особенность не позволяет в полной мере компенсировать тепловые потери, вызванные отражением луча лазера от поверхности образца, поскольку по мере движения пятна нагрева коэффициент поглощения в каждой из точек, лежащих на траектории теплового воздействия, будет постоянно изменяться. Еще один общий недостаток рассматриваемых методов – наличие механически подвижных узлов, имеющих различные люфты, дрейф, которые вносят дополнительные погрешности в результаты измерений.

Для устранения этих недостатков, присущих рассмотренным выше методам измерения ТФС материалов, разработан новый метод, сущность которого заключается в следующем [8, 37]. Над исследуемым образцом 1 помещают неподвижный точечный источник тепла (лазер) 2 и термодатчики 3, 4 (рис. 2.16). Причем термодатчик 4 установлен от источника 2 на расстоянии  $R_2$ , которое меньше значения толщины  $h_1$  верхнего слоя строительной конструкции. Этим обеспечивается такой режим нагрева, при котором исследуемый верхний слой конструкции можно считать полубесконечным в тепловом отношении телом, так как на тепловой режим в этом случае не будет практически оказывать влияние второй (нижний) слой строительной конструкции.



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

Вначале определяют по предложенной в разделе 2.2 методике коэффициент  $k$  по формуле (2.36). Далее включают источник тепла 2 и производят нагрев. Причем мощность источника тепла  $q_{\text{ит}}$  определяется до начала эксперимента по предложенной в разделе 2.2 методике, что обеспечит гарантию сохранения целостности исследуемого слоя.

В заданный момент времени  $\tau_1$ , формула для расчета величины которого будет приведена ниже, термоприемниками 3, 4 производят измерение избыточных температур  $T_1, T_2$  в точках контроля, расположенных на расстояниях  $R_1$  и  $R_2$ , соответственно, от центра пятна нагрева.

Затем продолжают нагрев до тех пор, пока в некоторый момент времени  $\tau_x$  термоприемник 4 не зафиксирует увеличение избыточной температуры в точке  $R_2$  до величины  $T_{2\text{зад}} = mT_2$ . Коэффициент  $m$  задается перед началом эксперимента таким, чтобы, с одной стороны, разница между температурами  $T_{2\text{зад}}$  и  $T_2$  была приблизительно на порядок выше чувствительности измерительной аппаратуры ( $m \geq 1,05$ ), а с другой – чтобы коэффициент  $m$  не превышал 1,15 [37]. Как показали исследования, невыполнение последнего условия ведет к увеличению времени измерений и снижению их точности. Используя измеренные параметры  $T_1, T_2$  и  $\tau_x$ , определяют искомые теплофизические свойства по зависимостям, полученным на основании следующих рассуждений.

Процесс распространения тепла непрерывно действующего точечного источника тепла мощностью  $q$ , воздействующего на поверхность полубесконечного в тепловом отношении тела, описывается следующим уравнением [38]:

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

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

Использование выражения (2.61) в том виде, в котором оно представлено, является затруднительным из-за невозможности выразить из него в аналитически явном виде коэффициент температуропроводности  $a$ . Рассмотрим функцию интеграла вероятности в выражении (2.61), которая в общем виде определяется по формуле [39]

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

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

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

сходящийся при любом  $\psi$ . Таким образом для выражения (2.61) можно записать

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

Действительно, выразить коэффициент температуропроводности  $a$  из выражения (2.64) практически невозможно. Однако, решить эту задачу можно путем аппроксимации функции интеграла вероятности  $\Phi$  в уравнении (2.61) более простым выражением при наложении определенных ограничений на полученную в результате математическую модель. Проведенные исследования показали, что для материалов с коэффициентом температуропроводности  $a \geq 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$  при выполнении усло-



вия  $\frac{R}{\sqrt{\tau}} \leq 0,0003$  можно ограничиться первым членом ряда выражения (2.64) при использовании соотношения (2.61), по-

скольку при отбрасывании оставшихся членов ряда погрешность вычисления  $T(R, \tau)$  не превышает 1 %. С учетом этого можно записать следующее выражение для описания процесса распространения тепла при действии непрерывного точечного источника тепла на поверхность полуограниченного в тепловом отношении тела:

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

Однако выражение (2.65) не учитывает тепловые потери, происходящие в окружающую среду при бесконтактном тепловом воздействии на поверхность исследуемого объекта неподвижным источником тепла. С учетом этого по аналогии с разработанным ранее методом (раздел 2.2) было составлено уравнение теплового баланса. Используя соответствующие соотношения для каждого из его слагаемых, после математических преобразований было получено выражение, описывающее температурное поле в полубесконечном в тепловом отношении теле при действии на него неподвижного точечного источника тепла, которое имеет следующий вид [40, 41]:

$$T(R, \tau) = \frac{\varepsilon\beta q_{ит} - q_{кл}}{4\pi\lambda R} \left( 1 - \frac{R}{\sqrt{\pi a \tau}} \right) + T_c = \frac{kq_{ит} - q_{кл}}{4\pi\lambda R} \left( 1 - \frac{R}{\sqrt{\pi a \tau}} \right) + T_c, \quad (2.66)$$

где  $q_{кл} = q_k + q_l$  – суммарные потери, вызванные конвективным и лучистым теплообменом поверхности тела с окружающей средой.

Из полученного выражения (2.66) измеряемые в момент времени  $\tau_1$  избыточные температуры в точках  $R_1$  и  $R_2$  будут определяться следующими выражениями соответственно:

$$T_1(R_1, \tau_1) = \frac{kq_{ит} - q_{кл1}}{4\pi\lambda R_1} \left( 1 - \frac{R_1}{\sqrt{\pi a \tau_1}} \right); \quad (2.67)$$

$$T_2(R_2, \tau_1) = \frac{kq_{ит} - q_{кл1}}{4\pi\lambda R_2} \left( 1 - \frac{R_2}{\sqrt{\pi a \tau_1}} \right). \quad (2.68)$$

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

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

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

$$T_{2зад}(R_2, \tau_x) = \frac{kq_{ит} - q_{кл2}}{4\pi\lambda R_2} \left( 1 - \frac{R_2}{\sqrt{\pi a \tau_x}} \right). \quad (2.70)$$

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

Проанализируем, как изменяются тепловые потери, возникающие с поверхности образца, при изменении времени эксперимента в  $n$  раз. Из выражений (2.67) и (2.70) видно, что потери, обусловленные поглощением части энергии лазерного луча окружающей средой, а также частичным отражением лазерного луча от поверхности исследуемого объекта (коэффициент  $k$ ), не зависят от времени, в отличие от потерь  $q_{кл}$ , вызванных конвективным и лучистым теплообменом с поверхности тела. Изменение потерь  $q_{кл}$  обусловлено изменением площади нагретой зоны  $S$ , а также удельных тепловых потоков конвективного  $\bar{q}_k$  и лучистого  $\bar{q}_l$  теплообмена в зависимости от времени. Рассмотрим, как изменяются с течением времени площадь нагретой зоны  $S$  и потери  $q_k$  и  $q_l$ , вызванные конвективным и лучистым теплообменом, соответственно. Граница температурного поля на поверхности исследуемого тела представляет собой изотерму в виде окружности, радиус  $R_{гп}$  которой можно определить из выражения (2.61) при условии, что избыточная температура на границе температурного поля  $T(R_{гп}, \tau) = 0$ :

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

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

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

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

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

Проанализируем, как с течением времени изменяются удельные тепловые потоки  $\bar{q}_k$  и  $\bar{q}_l$  с учетом того, что  $T_{2\text{зад}}(R_2, \tau_x) = mT_2(R_2, \tau_1)$ . Удельный тепловой поток конвективного теплообмена в момент времени  $\tau_1$  [21]

$$\bar{q}_{k1} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \alpha_{ki} T_i = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N A(T_i)^{4/3}, \quad (2.74)$$

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

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

$$\bar{q}_{kx} = \frac{A}{nN} \sum_{i=1}^N (mT_i)^{4/3} = \frac{m^{4/3} A}{nN} \sum_{i=1}^N (T_i)^{4/3} = \frac{m^{4/3}}{n} \bar{q}_{k1}. \quad (2.75)$$

Удельный тепловой поток лучистого теплообмена в момент времени  $\tau_1$  [21]

$$\bar{q}_{l1} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \alpha_{li} T_i \approx \frac{\varepsilon C_0}{N \cdot 10^8} \sum_{i=1}^N T_i^4, \quad (2.76)$$

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

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

$$\bar{q}_{lx} = \frac{\varepsilon C_0}{N \cdot 10^8} \sum_{i=1}^N (mT_i)^4 = \frac{m^4 \varepsilon C_0}{nN \cdot 10^8} \sum_{i=1}^N (T_i)^4 = \frac{m^4}{n} \bar{q}_{l1}. \quad (2.77)$$

Как показали исследования, для большинства материалов при изменении избыточной температуры поверхности тела в  $m = 1,05 \dots 1,15$  раз время изменяется также в  $m$  раз, т.е.  $m \approx n$ . С учетом вышесказанного из выражений (2.75) и (2.77) следует, что при увеличении времени в  $n$  раз удельный поток конвективного теплообмена  $\bar{q}_k$  практически не изменяется (в  $n^{1/3}$ ), а удельный тепловой поток лучистого теплообмена  $\bar{q}_l$  изменяется в  $n^3$  раз, но его значение на два порядка меньше  $\bar{q}_k$  [8], поэтому им можно пренебречь. Таким образом, при увеличении времени в  $n$  раз потери тепловой мощности за счет конвективного и лучистого теплообмена увеличиваются так же, как и площадь нагретой зоны, в  $n$  раз.

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

$$T_{2\text{зад}}(R_2, \tau_x) = mT_2(R_2, \tau_1) = \frac{kq_{\text{ит}} - nq_{\text{кл1}}}{4\pi\lambda R_2} \left( 1 - \frac{R_2}{\sqrt{\pi\alpha\tau_x}} \right). \quad (2.78)$$

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

$$\lambda = \frac{kq_{\text{ит}} \left( \frac{\tau_x}{\tau_1} - 1 \right)}{4\pi R_2 \left( \frac{\frac{\tau_x}{\tau_1} T_2}{\left( 1 - \frac{R_2}{\sqrt{\pi\alpha\tau_1}} \right)} - \frac{T_{2\text{зад}}}{\left( 1 - \frac{R_2}{\sqrt{\pi\alpha\tau_x}} \right)} \right)}. \quad (2.79)$$

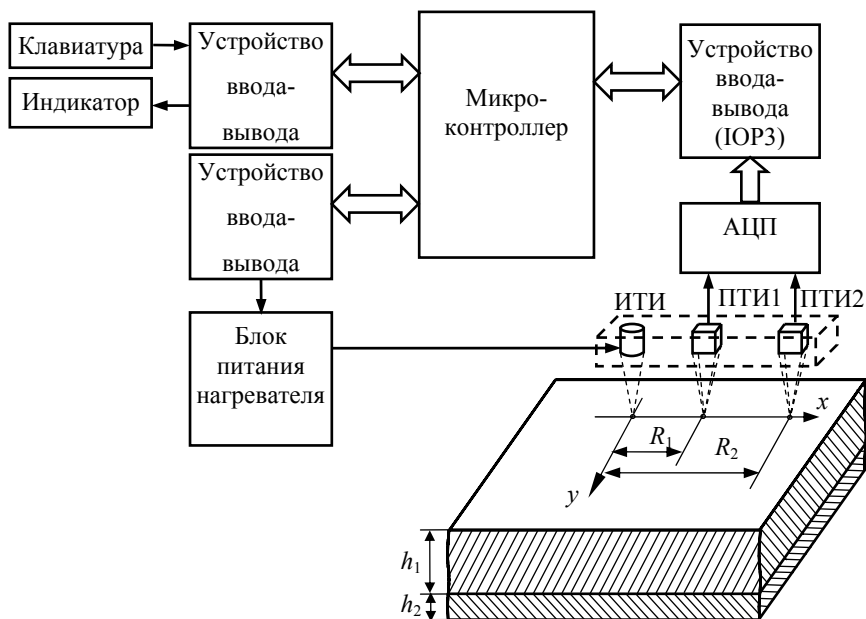
Таким образом, определив коэффициент  $k$ , значения избыточных температур  $T_1$ ,  $T_2$ , моменты времени  $\tau_1$  и  $\tau_x$ , зная мощность источника тепла, по формулам (2.69) и (2.79) можно определить искомые ТФС первого слоя исследуемой двухслойной строительной конструкции. Для определения ТФС второго слоя исследуемой двухслойной строительной конструкции измерительный зонд (источник тепла и термодатчик) фокусируют на поверхность второго слоя изделия и производят вышеописанные процедуры измерения.

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

Отличительной особенностью этого метода является то, что в нем используются неподвижно закрепленные источник излучения и термодатчик. Это позволяет устранить погрешности, присущие методам с подвижным измерительным зондом, и в большей степени уменьшить влияние тепловых потерь в окружающую среду на результаты измерений искомых ТФС, что существенно повышает метрологический уровень разработанного метода. Кроме того, отсутствие высокоточных

механически подвижных узлов позволяет значительно уменьшить стоимость устройства, реализующего предложенный метод. Таким образом, использование неподвижного измерительного зонда позволяет повысить точность контроля и расширить функциональные возможности предложенного метода по диапазонам и классам исследуемых материалов. Для реализации вышеизложенного метода НК ТФС двухслойных строительных конструкций разработана микропроцессорная ИИС [42, 43], блок-схема которой приведена на рис. 2.17.

Основным блоком ИИС является микропроцессорный контроллер (МПК), к которому подключены три порта ввода-вывода: IOP1, IOP2 и IOP3. Порты ввода-вывода предназначены для обмена сигналами управления и данными с внешними блоками и узлами системы. К порту IOP1 подключены индикатор и клавиатура. К порту IOP2 подключен АЦП, на вход которого поступают сигналы с приемников теплового излучения ПТИ1 и ПТИ2. АЦП предназначен для преобразования аналогового сигнала от приемников теплового излучения в цифровой двоичный код. Порт IOP3 соединен с блоком питания нагревателя БПН. Работа ИИС, реализующей описанный выше бесконтактный метод [42, 44], осуществляется следующим образом. После включения питания ИИС начинает выполнять программу, которая находится в ПЗУ МПК. Микропроцессорный контроллер выполняет необходимое тестирование системы, а затем устанавливает ее в исходное положение.



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

Запуск устройства оператор осуществляет с клавиатуры. МПК дает команду на измерение двумя неподвижными термодатчиками температуры в заданных точках поверхности исследуемого образца без воздействия на него источника тепла. Синхронно с этим происходит измерение температуры окружающей среды. По полученным результатам производится вычисление поправочного коэффициента, учитывающего потери, обусловленные поглощением части энергии лазерного луча окружающей средой, а также частичным отражением лазерного луча от поверхности исследуемого объекта. Затем МПК дает команду на включение лазера. Мощность излучения задается исходя из априорной информации о принадлежности исследуемого образца к определенному классу материалов. В момент времени  $\tau_1 = \left(\frac{R_2}{0,0003}\right)^2$  МПК дает команду двум не-

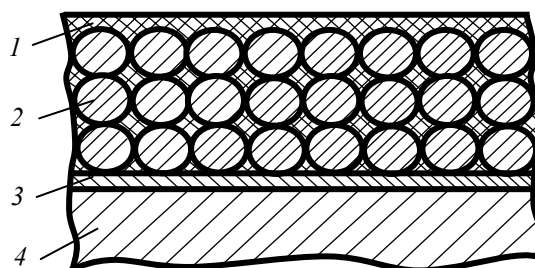
подвижным термодатчикам на измерение избыточных температур  $T_1$  и  $T_2$  в точках поверхности образца, расположенных на расстояниях  $R_1$  и  $R_2$  от центра пятна теплового воздействия. Значения измеренных температур через АЦП и устройство ввода-вывода заносятся в ОЗУ МПК. Затем производится вычисление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

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

## **2.6. МЕТОД И СИСТЕМА БЕСКОНТАКТНОГО НК КАЧЕСТВА МНОГОСЛОЙНЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ**

Для непрерывного НК качества (толщины слоев, ТФС, а также пористости металлического бронзового каркаса) металлофторопластовой ленты, используемой в строительстве, разработан метод [45, 46], отличительными особенностями которого являются бесконтактность измерения, оперативность и высокая производительность измерения, широкие функциональные возможности, возможность автоматизации процесса измерения. Поперечное сечение металлофторопластового ленточного материала показано на рис. 2.18. Его структуру можно представить состоящей из четырех слоев [47].

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



**Рис. 2.18. Разрез четырехслойного металлофторопластового ленточного материала:**

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

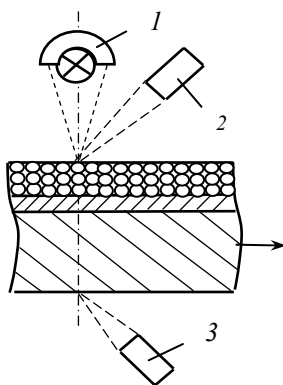
Третий, медно-оловянный слой, имеет толщину порядка 0,015 – 0,02 мм. Этот слой обеспечивает прочное сцепление бронзового пористого слоя со стальной основой, которая является четвертым слоем. Стальная основа образуется сталью Ст 08, а ее толщина находится в пределах 1 – 4 мм.

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

Для контроля пористости бронзового каркаса, ТФС и толщины приработочного слоя металлофторопластового материала разработан бесконтактный тепловой метод [45]. Устройство (рис. 2.19) состоит из источника тепловой энергии 1 и двух термодатчиков 2 и 3.

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

Алгоритм измерения осуществляется следующим образом. С помощью движущегося линейного источника тепла 1 постоянной мощности нагревают поверхность исследуемого изделия и измеряют установившуюся избыточную температуру  $T_1$  в центре источника тепла первым термодатчиком 2 и температуру  $T_2$  вторым термодатчиком 3 на поверхности изделия в точке, расположенной с обратной стороны напротив линейного источника тепла.



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

Термическое сопротивление последовательно соединенных составных стенок, ориентированных перпендикулярно тепловому потоку, определяется по формуле [48]

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

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

Поскольку разность установившихся избыточных температур, обусловленная сопротивлением различных слоев при тепловом воздействии источником постоянной мощности, определяется в соответствии с зависимостью вида  $\Delta T = qR$ , то зави-

симость между температурами  $T_1$  и  $T_2$  и тепловым потоком для трехслойной системы (рис. 2.19), состоящей из стального основания, слоя меди и слоя пористого бронзового каркаса, с известными толщинами слоев будет иметь вид

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

где  $h^1, \lambda_1$  – толщина и теплопроводность нижнего слоя;  $h^2, \lambda_2$  – толщина и теплопроводность второго слоя;  $h^3$  – толщина бронзового каркаса, измеренная летучим микрометром;  $S$  – площадь участка активного теплового воздействия;  $q$  – мощность теплового потока.

Тогда теплопроводность пористого бронзового каркаса определяется как

$$\bar{\lambda}_3 = \frac{h^3}{\frac{S\Delta T}{q} - \left( \frac{h^1}{\lambda_1} + \frac{h^2}{\lambda_2} \right)}. \quad (2.82)$$

Известно также [49], что теплопроводность пористого металлического каркаса связана с пористостью следующей зависимостью

$$\bar{\lambda}_3 = \lambda_k (1 - 1,5\Pi), \quad (2.83)$$

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

Тогда из формулы (2.83) можно определить пористость бронзового каркаса

$$\Pi = \frac{\lambda_k - \bar{\lambda}_3}{1,5\lambda_k}. \quad (2.84)$$

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

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

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

Известно [50], что измеряемая среднеинтегральная по объему теплопроводность  $\bar{\lambda}_4$  двухкомпонентной системы определяется выражением

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

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

Так как

$$m_{\Phi} = \vartheta_{\Phi} V_{\Phi} = \vartheta_{\Phi} S h^4, \quad m_k = \vartheta_{\text{бр}} V_{\text{бр}} = \vartheta_{\text{бр}} (1 - \Pi) = \vartheta_{\text{бр}} S h^4 (1 - \Pi),$$

где  $\vartheta_{\text{бр}}, \vartheta_{\Phi}$  – соответственно плотность фторопласта-4 с наполнителем и бронзы в компактном состоянии;  $V$  – объем двухкомпонентной системы, подверженный тепловому воздействию, то

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

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

$$\bar{\lambda}_4 = \frac{\vartheta_{\Phi}\lambda_{\Phi} + \vartheta_{\text{бр}}(1 - \Pi)(1 - 1,5\Pi)\lambda_k}{\vartheta_{\Phi} + \vartheta_{\text{бр}}(1 - \Pi)}. \quad (2.88)$$

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

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

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

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

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

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

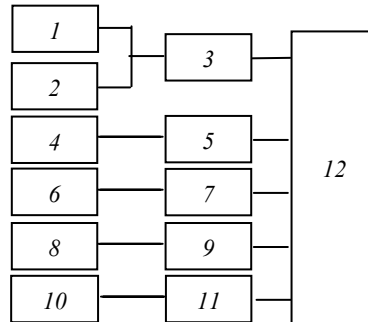


Рис. 2.20. Схема измерительной системы

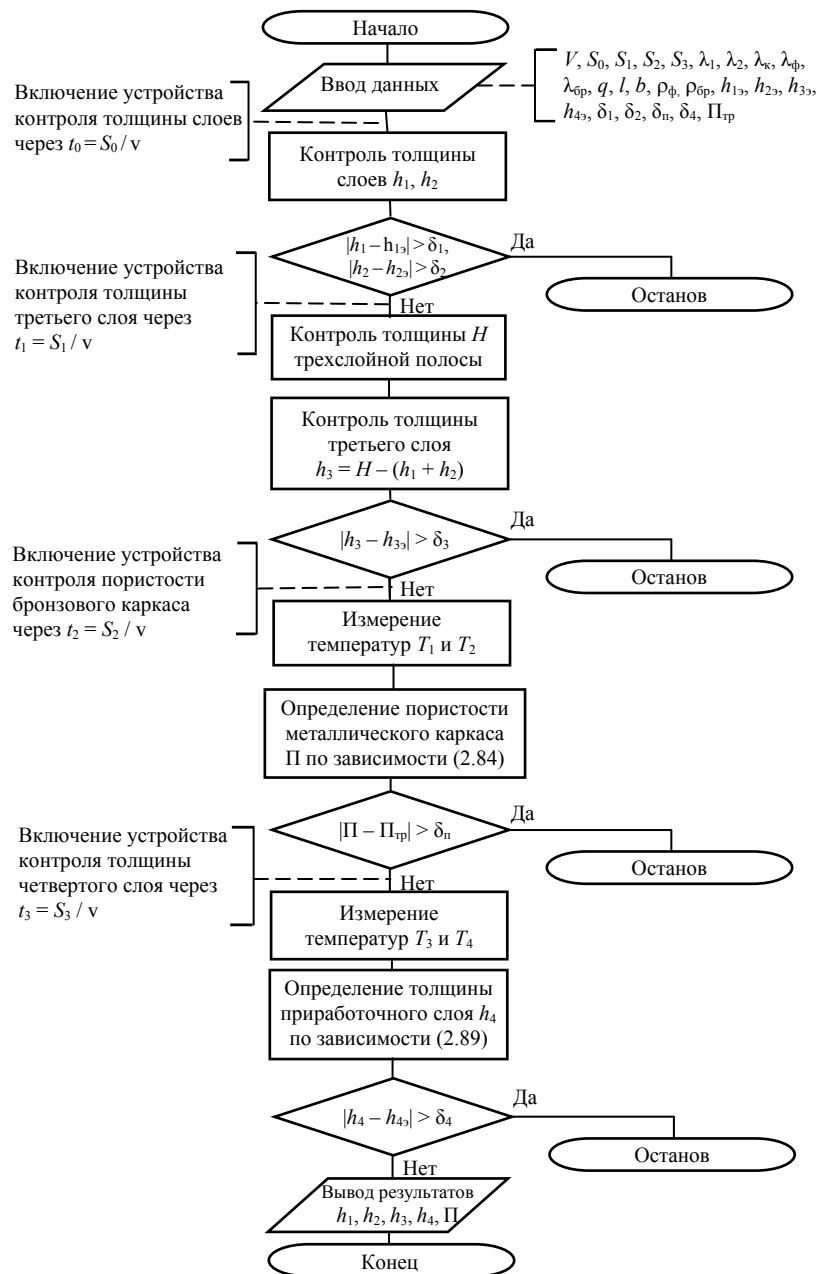


Рис. 2.21. Блок-схема алгоритма работы измерительной системы

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

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

В разделе 2 выведены соотношения косвенных измерений ТФС исследуемых материалов многослойных строительных конструкций и изделий, которые описывают процедуры, обеспечивающие возможность определения искомых свойств с достаточной для технологического контроля точностью. Анализ точности результатов измерений может быть выполнен на основе предложенной в [51] методике, которая заключается в следующем.

Получение оценок характеристик погрешностей на расчетной основе предполагает использование содержащихся в математических моделях объектов и процедур измерений соответствующих для синтеза аналитических соотношений. Такие соотношения могут быть получены, если указанные математические модели содержат всю необходимую информацию.

Так, при наличии уравнения измерений

$$\lambda_j^* = R_m \dots R_1 \gamma_j(t, \vec{r}), \quad (3.1)$$

выражающего результат измерения через последовательность  $m$  элементарных измерительных преобразований входного воздействия  $\gamma_j(t, \vec{r})$ , использование для синтеза расчетного соотношения известного выражения для характеристики погрешности  $\theta[\Delta\lambda_j^*]$

$$\theta[\Delta\lambda_j^*] = \int_{\Delta\lambda} q[\Delta\lambda_j^*] \omega(\Delta\lambda_j^*) d\Delta\lambda_j^* \quad (3.2)$$

( $q[\Delta\lambda_j^*]$  – преобразование, лежащее в основе определения характеристики  $\theta$ ,  $\omega(\Delta\lambda_j^*)$  – распределение плотности вероятности погрешности  $\Delta\lambda_j^*$ ) предполагает представление математическими моделями информации, позволяющей установить область существования погрешности  $\Delta\lambda$  и вид распределения  $\omega(\Delta\lambda_j^*)$ ). Иначе говоря, математические модели входного воздействия и использованных измерительных средств должны отражать их свойства в той степени, которая позволяет на основе (3.1) и (3.2) синтезировать необходимое расчетное соотношение.

Используя изложенный ниже подход, проведем анализ точности результатов измерений разработанных методов ТФС многослойных строительных конструкций и изделий.

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

В разделе 2.1 выведены соотношения (2.9) и (2.10) для косвенных определений ТФС наружных слоев исследуемых многослойных строительных конструкций. Исключив из рассмотрения погрешности округления результатов числовых измерительных преобразований (как промежуточных, так и конечных), представим уравнение для определения температуропроводности в следующем виде

$$a_j^* = \frac{x_{1j}^2}{4} \frac{F_{x_{2j}}^{*2} T_{зад1j} C_1 - F_{x_{1j}}^{*2} T_{зад2j} C_2}{F_{x_{2j}}^* T_{зад1j} C_3 - F_{x_{1j}}^* T_{зад2j} C_4}. \quad (3.3)$$

Соответственно уравнение для определения теплопроводности на основе (2.10) имеет вид

$$\lambda_j^* = \frac{Q_j F_{x_{1j}}^*}{2\pi T_{зад1j}} C_3 \exp\left(-\frac{x_{1j}^2 F_{x_{1j}}^*}{4a_j^*}\right). \quad (3.4)$$

Рассмотрим уравнение (3.3). Его структура показывает, что полная погрешность  $\Delta a_j^*$  зависит от точности установления  $x_1$ ,  $T_{зад1}$  и  $T_{зад2}$ , а также от точности измерений  $F_{x_1}$  и  $F_{x_2}$ . Следовательно,

$$\Delta a_j^* = a_j^* - a_j = \Delta_{x_1} a_j^* + \Delta_{T_1} a_j^* + \Delta_{T_2} a_j^* + \Delta_{F_1} a_j^* + \Delta_{F_2} a_j^*, \quad (3.5)$$

где 
$$\Delta_{x_1} a_j^* = \frac{2x_{1ij} \Delta x_{1j} + \Delta^2 x_{1j}}{4} \frac{F_{x_{1j}}^2 T_{зад2ij} C_1 - F_{x_{2j}}^2 T_{зад1ij} C_2}{F_{x_{1j}} T_{зад2ij} C_3 - F_{x_{2j}} T_{зад1ij} C_4} - \quad (3.6)$$

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

$$\Delta_{T_1} a_j^* = \frac{x_{1j}^2}{4} \times \left[ \frac{(F_{x_{1j}}^2 T_{зад2и} C_1 - F_{x_{2j}}^2 T_{зад1и} C_2) F_{x_{2j}} \Delta T_{зад1j} C_4}{(F_{x_{1j}} T_{зад2и} C_3 - F_{x_{1j}} T_{зад1и} C_4 - F_{x_{1j}} \Delta T_{зад1j} C_4) (F_{x_{1j}} T_{зад2и} C_3 - F_{x_{2j}} T_{зад1и} C_4)} - \right]$$



$$\left. - \frac{F_{x_{2j}}^2 \Delta T_{зад1j} C_2}{F_{x_{1j}} T_{зад2иj} C_3 - F_{x_{2j}} T_{зад1иj} C_4 + F_{x_{2j}} \Delta T_{зад1j} C_4} \right] - \quad (3.7)$$

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

$$\Delta_{T_2} a_j^* = \frac{x_{1j}^2}{4} \times \left[ \frac{(F_{x_{1j}}^2 T_{зад2иj} C_1 - F_{x_{2j}}^2 T_{зад1j} C_2)(-F_{x_{1j}} \Delta T_{зад2j} C_3)}{(F_{x_{1j}} T_{зад2иj} C_3 + F_{x_{1j}} \Delta T_{зад2j} C_3 - F_{x_{2j}} T_{зад1j} C_4)(F_{x_{1j}} T_{зад2иj} C_3 - F_{x_{2j}} T_{зад1j} C_4)} + \frac{F_{x_{1j}}^2 \Delta T_{зад2j} C_1}{F_{x_{1j}} T_{зад2иj} C_3 + F_{x_{1j}} \Delta T_{зад2j} C_3 - F_{x_{2j}} T_{зад1j} C_4} \right] - \quad (3.8)$$

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

$$\Delta_{F_1} a_j^* = \frac{x_{1j}^2}{4} \times \left[ \frac{(F_{x_{1j}}^2 T_{зад2j} C_1 - F_{x_{2j}}^2 T_{зад1j} C_2)(-\Delta F_{x_{1j}}^* \Delta T_{зад2j} C_3)}{(F_{x_{1j}} T_{зад2j} C_3 + F_{x_{1j}}^* \Delta T_{зад2j} C_3 - F_{x_{2j}} T_{зад1j} C_4)(F_{x_{1j}} T_{зад2j} C_3 - F_{x_{2j}} T_{зад1j} C_4)} + \frac{(2F_{x_{1j}}^2 \Delta F_{x_{1j}}^* + \Delta^2 F_{x_{1j}}^*) T_{зад2j} C_1}{F_{x_{1j}} T_{зад2j} C_3 + \Delta F_{x_{1j}}^* T_{зад2j} C_3 - F_{x_{2j}} T_{зад1j} C_4} \right] - \quad (3.9)$$

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

$$\Delta_{F_2} a_j^* = \frac{x_{1j}^2}{4} \times \left[ \frac{(F_{x_{1j}}^{*2} T_{зад2j} C_1 - F_{x_{2j}}^2 T_{зад1j} C_2) \Delta F_{x_{2j}}^* \Delta T_{зад1j} C_4}{(F_{x_{1j}}^* T_{зад2j} C_3 - F_{x_{2j}} T_{зад1j} C_4 - \Delta F_{x_{2j}}^* T_{зад1j} C_4)(F_{x_{1j}}^* T_{зад2j} C_3 - F_{x_{2j}} T_{зад2j} C_4)} - \frac{(2F_{x_{2j}} \Delta F_{x_{2j}}^* + \Delta^2 F_{x_{2j}}^*) T_{зад1j} C_2}{F_{x_{1j}}^* T_{зад2j} C_3 - F_{x_{2j}} T_{зад1j} C_4 - \Delta F_{x_{2j}}^* T_{зад1j} C_4} \right] - \quad (3.10)$$

погрешность, обусловленная отличием  $F_{x_{2j}}^*$  от  $\Delta F_{x_{2j}}$  ( $F_{x_{2j}}^* = F_{x_{2j}} + \Delta F_{x_{2j}}^*$ ).

Переходя к рассмотрению уравнения (3.4), получаем

$$\Delta \lambda_j^* = \Delta_Q \lambda_j^* + \Delta_{F_1} \lambda_j^* + \Delta_{T_1} \lambda_j^* + \Delta_{x_1} \lambda_j^* + \Delta_a \lambda_j^*, \quad (3.11)$$

$$\text{где} \quad \Delta_Q \lambda_j^* = \Delta Q_j \frac{F_{x_{1j}} C_3}{2\pi T_{зад1иj}} \exp\left(-\frac{x_{1иj}^2 F_{x_{1j}}}{4a_j}\right) - \quad (3.12)$$

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

$$\Delta_{F_1} \lambda_j^* = \frac{Q_j C_3}{2\pi T_{зад1иj}} \left[ F_{x_{1j}} \exp\left(-\frac{x_{1иj}^2 F_{x_{1j}}}{4a_j}\right) \left( \exp\left(-\frac{x_{1иj}^2 \Delta F_{x_{1j}}}{4a_j}\right) - 1 \right) + \Delta F_{x_{1j}}^* \exp\left(-\frac{x_{1иj}^2 F_{x_{1j}}}{4a_j}\right) \right] - \quad (3.13)$$

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

$$\Delta_{T_1} \lambda_j^* = \frac{Q_j F_{x_{1j}}^* C_3}{2\pi} \exp\left(-\frac{x_{1j}^2 F_{x_{1j}}}{4a_j}\right) \left(-\frac{\Delta T_{\text{зад}1j}}{T_{\text{зад}1j} T_{\text{зад}1иj}}\right) - \quad (3.14)$$

погрешность из-за отличия  $T_{\text{зад}1j}$  от  $T_{\text{зад}1иj}$ ;

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

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

$$\Delta_a \lambda_j^* = \frac{Q_j F_{x_{1j}}^* C_3}{2\pi T_{\text{зад}1j}} \exp\left(-\frac{x_{1j}^2 F_{x_{1j}}^*}{4a_j}\right) \left(\exp\left(\frac{x_{1j}^2 F_{x_{1j}}^* \Delta a_j^*}{4a_j^* a_j}\right) - 1\right) - \quad (3.15)$$

погрешность из-за отличия  $a_j^*$  от  $a_j$  ( $\Delta a_j^*$  определяется соотношением (3.5)).

Полученные для компонент соотношения позволяют оценить характеристики этих компонент, выделить доминанты и определить характеристики полных погрешностей  $\Delta a_j^*$  и  $\Delta \lambda_j^*$ . При анализе характеристик  $\Delta a_j^*$  и  $\Delta \lambda_j^*$  полагается, что ансамбль измерительных экспериментов относится к определению ТФС различных материалов в различных условиях, когда величины  $T_{\text{зад}1и}$ ,  $T_{\text{зад}2и}$ ,  $F_{x_1}$ ,  $F_{x_2}$ ,  $x_1$  и  $Q$  случайны.

Анализ исходных данных и прямой расчет показывает [52, 53], что из пяти компонент  $\Delta a_j^*$  доминируют две  $\Delta_{T_1} a_j^*$  и  $\Delta_{T_2} a_j^*$ , т.е.

$$\Delta a_j^* \cong \Delta_{T_1} a_j^* + \Delta_{T_2} a_j^*. \quad (3.16)$$

Эти компоненты могут быть представлены в следующем виде

$$\Delta_{T_1} a_j^* \cong \frac{x_{1иj}^2}{4} \Delta T_{\text{зад}1} \left( \frac{(F_{x_{1j}}^2 T_{\text{зад}2иj} C_1 - F_{x_{2j}}^2 T_{\text{зад}1иj} C_2) F_{x_{2j}} C_4}{(F_{x_{1j}} T_{\text{зад}2иj} C_3 - F_{x_{2j}} T_{\text{зад}1иj} C_4)^2} - \frac{F_{x_{2j}} C_2}{F_{x_{1j}} T_{\text{зад}2иj} C_3 - F_{x_{2j}} T_{\text{зад}1иj} C_4} \right) \quad (3.17)$$

и

$$\Delta_{T_2} a_j^* \cong \frac{x_{1иj}^2}{4} \Delta T_{\text{зад}2j} \left( \frac{F_{x_{1j}} C_1}{F_{x_{1j}} T_{\text{зад}2иj} C_3 - F_{x_{2j}} T_{\text{зад}1иj} C_4} - \frac{(F_{x_{1j}}^2 T_{\text{зад}2иj} C_1 - F_{x_{2j}}^2 T_{\text{зад}1иj} C_2) F_{x_{1j}} C_3}{(F_{x_{1j}} T_{\text{зад}2иj} C_3 - F_{x_{2j}} T_{\text{зад}1иj} C_4)^2} \right). \quad (3.18)$$

Эти выражения получены соответственно из (3.7) и (3.8) в предположении, что  $x_1 \cong x_{1и}$  и  $T_{\text{зад}1} \cong T_{\text{зад}1и}$ . Поскольку аналитическое определение систематической погрешности

$$M[\Delta a_j^*] = M[\Delta_{T_1} a_j^*] + M[\Delta_{T_2} a_j^*] \quad (3.19)$$

и среднеквадратического отклонения погрешности

$$D^{1/2}[\Delta a_j^*] = [D[\Delta_{T_1} a_j^*] + D[\Delta_{T_2} a_j^*] + 2B_{\Delta_{T_1} \Delta_{T_2}}]^{1/2} \quad (3.20)$$

( $B_{\Delta_{T_1} \Delta_{T_2}}$  – корреляционная функция  $\Delta_{T_1} a_j^*$  и  $\Delta_{T_2} a_j^*$ ) с учетом распределений вероятности случайных величин  $\Delta T_{\text{зад}1}$ ,  $\Delta T_{\text{зад}2}$ ,  $\Delta T_{\text{зад}1и}$ ,  $\Delta T_{\text{зад}2и}$ ,  $T_{x_1}$ ,  $T_{x_2}$  и  $x_1$  оказывается нереализуемым, используем оценку этих характеристик сверху.

Из априорных сведений следует, что  $M[\Delta T_{\text{зад}1}] = M[\Delta T_{\text{зад}2}] = 0$ .

Из этого вытекает, что  $M[\Delta a_j^*] = 0$ , и с учетом некоррелированности  $T_{\text{зад}1}$  и  $\Delta T_{\text{зад}2}$ ,  $B_{\Delta_{T_1} \Delta_{T_2}} = 0$ .

Соответственно

$$\max D[\Delta a_j^*] = \max D[\Delta_{T_1} a_j^*] + \max D[\Delta_{T_2} a_j^*]. \quad (3.21)$$

Из (3.17) и (3.18) вытекает, что

$$D^*[\Delta_{T_1} a_j^*] = D[\Delta T_{зад1j}] \max \left| \frac{x_{1nj}^2}{4} \left( \frac{(F_{x1j}^2 T_{зад2nj} C_1 - F_{x2j}^2 T_{зад1nj} C_2)}{(F_{x1j} T_{зад2nj} C_3 - F_{x2j} T_{зад1nj} C_4)^2} \times \right. \right. \\ \left. \left. \times F_{x2nj} C_4 - \frac{F_{x2j} C_2}{F_{x1j} T_{зад2nj} C_3 - F_{x2j} T_{зад1nj} C_4} \right|^2; \quad (3.22)$$

$$D^*[\Delta_{T_2} a_j^*] = D[\Delta T_{зад2j}] \max \left| \frac{x_{1nj}^2}{4} \left( -\frac{(F_{x1j}^2 T_{зад2nj} C_1 - F_{x2j}^2 T_{зад1nj} C_2)}{(F_{x1j} T_{зад2nj} C_3 - F_{x2j} T_{зад1nj} C_4)^2} \times \right. \right. \\ \left. \left. \times F_{x2nj} C_3 + \frac{F_{x1j} C_1}{F_{x1j} T_{зад2nj} C_3 - F_{x2j} T_{зад1nj} C_4} \right|^2. \quad (3.23)$$

Расчет показал, что при определении характеристик погрешности  $\Delta \lambda_j^*$  можно пренебречь компонентами  $\Delta_{F_1} \lambda_j^*$ ,  $\Delta_Q \lambda_j^*$  и  $\Delta_{x_1} \lambda_j^*$ , в результате чего получим

$$\Delta \lambda_j^* = \Delta_{T_1} \lambda_j^* + \Delta_a \lambda_j^*. \quad (3.24)$$

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

$$\Delta_{T_1} \lambda_j^* = \frac{Q_{nj} F_{x1j} C_3}{2\pi} \exp\left(-\frac{x_{1nj}^2}{4a_j}\right) \left(-\frac{\Delta T_{зад1j}}{T_{зад1nj}^2}\right) \quad (3.25)$$

и

$$\Delta_a \lambda_j^* = \frac{Q_{nj} F_{x1j} C_3}{2\pi T_{зад1nj}} \exp\left(-\frac{x_{1nj}^2 F_{x1j}}{4a_j}\right) \left(\exp\left(-\frac{x_{1nj}^2 F_{x1j} \Delta a_j^*}{4a_j^2}\right) - 1\right), \quad (3.26)$$

имеем  $M[\Delta_Q \lambda_j^*] = M[\Delta_{T_1} \lambda_j^*] = 0$  и, соответственно,

$$M[\Delta \lambda_j^*] = M[\Delta_a \lambda_j^*] = 0. \quad (3.27)$$

Обращаясь к оценке  $M[\Delta \lambda_j^*]$  сверху, приходим к соотношению

$$M^*[\Delta \lambda_j^*] = \max \left[ \frac{Q_{nj} 2a_j^2 C_3}{\Delta a \pi T_{зад1nj} x_{1nj}^2} \exp\left(-\frac{x_{1nj}^2 F_{x1j}}{4a_j}\right) \times \right. \\ \left. \times \left( \exp\left(-\frac{x_{1nj}^2 F_{x1j} \Delta a}{8a_j^2}\right) - \exp\left(-\frac{x_{1nj}^2 F_{x1j} \Delta a}{8a_j^2}\right) - 1 \right) \right] \quad (3.28)$$

(полагается,  $\omega(\Delta a_j^*) = \frac{1}{\Delta a}$  при  $\Delta a_j^* \in \left[-\frac{\Delta a}{2}; \frac{\Delta a}{2}\right]$ ).

Для среднеквадратического отклонения  $\Delta \lambda_j^*$  имеем

$$D^{1/2}[\Delta \lambda_j^*] = [D[\Delta_Q \lambda_j^*] + D[\Delta_{T_1} \lambda_j^*] + D[\Delta_a \lambda_j^*]] +$$

$$+ 2B_{\Delta_Q \Delta_{T_1}} + 2B_{\Delta_Q \Delta_a} + 2B_{\Delta_{T_1} \Delta_a} \Big]^{1/2}. \quad (3.29)$$

В силу некоррелированности  $\Delta_Q \lambda_j^*$ ,  $\Delta_{T_1} \lambda_j^*$  и  $\Delta_a \lambda_j^*$

$$D^{1/2}[\Delta \lambda_j^*] = \left[ D[\Delta_Q \lambda_j^*] + D[\Delta_{T_1} \lambda_j^*] + D[\Delta_a \lambda_j^*] \right]^{1/2}. \quad (3.30)$$

Оценки сверху дисперсии  $\Delta \lambda_j^*$  и ее основных компонент имеют вид

$$D^*[\Delta \lambda_j^*] = \max D[\Delta_Q \lambda_j^*] + \max D[\Delta_{T_1} \lambda_j^*] + \max D[\Delta_a \lambda_j^*]; \quad (3.31)$$

$$\max D[\Delta_Q \lambda_j^*] = D[\Delta_Q] \max \left( \frac{F_{x_{1j}} C_3}{2\pi T_{\text{зад}_{1j}}} \exp \left( -\frac{x_{1j}^2 F_{x_{1j}}}{4a_j} \right) \right)^2; \quad (3.32)$$

$$\max D[\Delta_{T_1} \lambda_j^*] = D[\Delta T_{\text{зад}_{1j}}] \max \left( \frac{Q_{1j} F_{x_{1j}} C_3}{2\pi T_{\text{зад}_{1j}}^2} \exp \left( -\frac{x_{1j}^2 F_{x_{1j}}}{4a_j} \right) \right)^2; \quad (3.33)$$

$$\begin{aligned} \max D[\Delta_a \lambda_j^*] = & \max \left( \frac{Q_{1j} F_{x_{1j}} C_3}{2\pi T_{\text{зад}_{1j}}} \exp \left( -\frac{x_{1j}^2 F_{x_{1j}}}{4a_j} \right) \right)^2 \times \\ & \times \left( \frac{2a_j^2}{\Delta_a x_{1j}^2 F_{x_{1j}}} \left( \exp \left( \frac{x_{1j}^2 F_{x_{1j}}}{4a_j^2} \Delta_a \right) - \exp \left( -\frac{x_{1j}^2 F_{x_{1j}}}{4a_j^2} \Delta_a \right) - 1 \right) - \right. \\ & \left. - \frac{4a_j^2}{\Delta_a x_{1j}^2 F_{x_{1j}}} \left( \exp \left( \frac{x_{1j}^2 F_{x_{1j}}}{8a_j^2} \Delta_a \right) - \exp \left( -\frac{x_{1j}^2 F_{x_{1j}}}{8a_j^2} \Delta_a \right) - 1 \right) \right). \quad (3.34) \end{aligned}$$

Для анализа погрешности при измерении ТФС внутреннего слоя трехслойной строительной конструкции рассмотрим уравнение (2.15)

$$\lambda_{2j}^* = \frac{q_{xj}^* R_2}{T_{2j}^* - T_{3j}^*}.$$

Его структура показывает, что полная погрешность  $\Delta \lambda_2$  зависит от точности установления  $R_2$ , а также от точности измерения  $q_x$ ,  $T_2$  и  $T_3$ . Следовательно:

$$\Delta \lambda_{2j} = \lambda_j^* - \lambda_j = \Delta_{R_2} \lambda_j^* + \Delta_{q_x} \lambda_j^* + \Delta_{T_2} \lambda_j^* + \Delta_{T_3} \lambda_j^*, \quad (3.35)$$

где  $\Delta_{R_2} \lambda_j^* = \frac{\Delta R_2 q_{xj}}{T_{2j} - T_{3j}}$  – погрешность, обусловленная отличием  $R_2$  от истинного значения  $R_{2н}$ , т.е.  $R_2 = R_{2н} + \Delta R_2$ ;

$\Delta_{q_x} \lambda_j^* = \frac{\Delta q_x R_{2j}}{T_{2j} - T_{3j}}$  – погрешность, обусловленная отличием  $q_x$  от истинного значения  $q_{xн}$ , т.е.  $q_x = q_{xн} + \Delta q_{xj}$ ;

$\Delta_{T_2} \lambda_j^* = q_{xj} R_{2j} \left( \frac{1}{T_{2н} - \Delta T_2 - T_{3j}} - \frac{1}{T_{2н} - T_{3j}} \right)$  – погрешность, обусловленная отличием  $T_2$  от истинного значения  $T_{2н}$ , т.е.

$T_2 = T_{2н} + \Delta T_2$ ;  $\Delta_{T_3} \lambda_j^* = q_{xj} R_{2j} \left( \frac{1}{T_{3н} - \Delta T_3 - T_{2j}} - \frac{1}{T_{3н} - T_{2j}} \right)$  – погрешность, обусловленная отличием  $T_3$  от истинного значения  $T_{3н}$ , т.е.  $T_3 = T_{3н} + \Delta T_3$ .

Полученные для компонент соотношения позволяют оценить характеристики введенных компонент, выделить доминанты и определить характеристики полных погрешностей  $\Delta a_j^*$  и  $\Delta \lambda_j^*$  [52, 53]. Результаты выделения доминирующих составляющих в общей погрешности измерения ТФС материалов представлены в табл. 3.1.

При анализе характеристик  $\Delta a_j^*$  и  $\Delta \lambda_j^*$  получается, что ансамбль измерительных экспериментов относится к определению ТФС многослойных изделий в различных условиях, когда величины  $R_2$ ,  $x_1$ ,  $F_{x1}$ ,  $F_{x2}$ ,  $q_{ит}$ ,  $q_x$ ,  $T_1$ ,  $T_2$ ,  $T_3$  случайны.

Анализ исходных данных и расчет на основе полученных аналитических соотношений (3.5) – (3.35) показывают, что из четырех компонент теплопроводности  $a_n$  доминируют  $F_{x2}$  и  $x_1$ , далее  $T_1$ ,  $T_2$  и  $F_{x1}$ .

Для теплопроводности  $\lambda_n$  доминируют  $q_{ит}$  и  $T_1$ , далее по степени значимости следуют  $F_{x1}$ ,  $x_1$  и  $a$ .

Для теплопроводности  $\lambda_v$  доминируют  $T_3$  и  $T_2$ , далее по степени значимости следуют  $q_x$  и  $R_2$ .

Полученная информация о доминирующих компонентах и их вкладе в общую погрешность контроля ТФС исследуемых многослойных строительных конструкций позволяет провести коррекцию результатов измерения, а в теплофизическом эксперименте целенаправленно воздействовать на источники этих составляющих общей погрешности.

Таблица 3.1

Параметр	$x_1$	$T_1$	$T_2$	$F_{x1}$	$F_{x2}$	$q_{ит}$	$q_x$	$a$	$T_3$	$R_2$
Максимальное отклонение, %	$\delta a_n$	9	1,5	1,5	0,6	10	–	–	–	–
	$\delta \lambda_n$	4,7	9	–	7,5	–	10	–	2,3	–
	$\delta \lambda_v$	–	–	13,6	–	–	–	10	–	18

Примечание: отклонение каждого параметра  $\pm 10\%$  при постоянстве остальных параметров,  $\delta a_n$  и  $\delta \lambda_n$  – относительные погрешности ТФС наружных слоев, а  $\delta \lambda_v$  – внутреннего слоя.

### 3.2. АНАЛИЗ ПОГРЕШНОСТИ БЕСКОНТАКТНОГО МЕТОДА НК ТФС ДВУХСЛОЙНЫХ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ С КОРРЕКЦИЕЙ ВЛИЯНИЯ СТЕПЕНИ ЧЕРНОТЫ ИССЛЕДУЕМЫХ ОБЪЕКТОВ НА РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Для бесконтактного метода НК ТФС двухслойных строительных конструкций, рассмотренного в разделе 2.2, уравнения измерений коэффициентов теплопроводности  $a$  и теплопроводности  $\lambda$  имеют следующий вид:

$$a_j^* = \frac{V(R_1 - x_1)}{2 \ln \left[ \frac{R_{x1j}}{R_1} \right]}; \quad (3.36)$$

$$\lambda_j^* = \frac{k_j^* q_{ит} (\sqrt{2} - 1)}{\pi T_{1j}^*(x) [2\sqrt{2} R_{x1j}^* - R_{x2j}^*]}, \quad (3.37)$$

где  $V$  – скорость движения источника и термоприемников относительно исследуемого тела;  $R_1, R_{x1}, R_{x2}$  – соответственно заданное и найденные в  $j$ -м эксперименте расстояния между центром пятна нагрева и точками контроля температуры;  $x_1$  – расстояние между центром пятна нагрева и проекцией точки  $R_1$  на линию движения источника тепла;  $k$  – коэффициент, учитывающий значение коэффициента излучения  $\epsilon$  поверхности исследуемого образца, а также коэффициента прозрачности  $\beta$  окружающей среды, разделяющей поверхность исследуемого образца и приемно-излучательные блоки измерительной системы;  $q_{ит}$  – мощность источника тепла (лазера);  $T_1^*(x)$  – значение интегральной во времени избыточной температуры в точке на расстоянии  $R_{x2}$  от центра пятна нагрева при мощности источника  $2q_{ит}$ .

Рассмотрим уравнение (3.36). Его структура показывает, что полная погрешность  $\Delta a_j^*$  зависит от точности установления  $V, R_1, x_1$ , а также от точности измерений  $R_{x1}$ . Следовательно,

$$\Delta a_j^* = a_j^* - a_j = \Delta_V a_j^* + \Delta_{R_1} a_j^* + \Delta_{x_1} a_j^* + \Delta_{R_{x1}} a_j^*, \quad (3.38)$$

где  $\Delta_V a_j^* = \frac{\Delta V (R_{1j} - x_{1j})}{2 \ln \left[ \frac{R_{x1j}}{R_{1j}} \right]}$  – погрешность, обусловленная отличием  $V$  от истинного значения  $V_n$ , т.е.  $V = V_n + \Delta V$ ;

$\Delta_{R_1} a_j^* = \frac{V}{2} \left[ \frac{R_{1n} + \Delta R_1 - x_{1j}}{\ln \left[ \frac{R_{x1j}}{R_{1n} + \Delta R_1} \right]} - \frac{R_{1n} - x_{1j}}{\ln \left[ \frac{R_{x1j}}{R_{1n}} \right]} \right]$  – погрешность, обусловленная отличием  $R_1$  от  $R_{1n}$  ( $R_1 = R_{1n} + \Delta R_1$ );

$\Delta_{x_1} a_j^* = -\frac{V \Delta x_1}{2 \ln \left[ \frac{R_{x1j}}{R_{1j}} \right]}$  – погрешность, обусловленная отличием  $x_1$  от  $x_{1n}$  ( $x_1 = x_{1n} + \Delta x_1$ );

$$\Delta_{R_{x1}} a_j^* = \frac{V(R_{1j} - x_{1j})}{2} \left[ \frac{1}{\ln \left[ \frac{R_{x1и} + \Delta R_{x1}}{R_{1j}} \right]} - \frac{1}{\ln \left[ \frac{R_{x1и}}{R_{1j}} \right]} \right] - \text{погрешность, обусловленная отличием } R_{x1} \text{ от } R_{x1и} (R_{x1} = R_{x1и} + \Delta R_{x1}).$$

Рассмотрим далее уравнение (3.37). Его структура показывает, что полная погрешность  $\Delta \lambda_j^*$  зависит от точности установления  $q_{ит}$ , а также от точности измерений  $T_1^*(x)$ ,  $R_{x1}$ ,  $R_{x2}$  и определения  $k$ :

$$\Delta \lambda_j^* = \Delta_{q_{ит}} \lambda_j^* + \Delta_{T_1^*(x)} \lambda_j^* + \Delta_{R_{x1}} \lambda_j^* + \Delta_{R_{x2}} \lambda_j^* + \Delta_k \lambda_j^*, \quad (3.39)$$

где  $\Delta_{q_{ит}} \lambda_j^* = \frac{k_j \Delta q_{ит} (\sqrt{2} - 1)}{\pi T_{1j}^*(x) [2\sqrt{2} R_{x1j} - R_{x2j}]} - \text{погрешность из-за отличия } q_{ит} \text{ от } q_{ит}^н (q_{ит} = q_{ит}^н + \Delta q_{ит});$

$\Delta_{T_1^*(x)} \lambda_j^* = \frac{k_j q_{итj} (\sqrt{2} - 1)}{\pi (2\sqrt{2} R_{x1j} - R_{x2j})} \left[ \frac{1}{T_{1и}^*(x) + \Delta T_1^*(x)} - \frac{1}{T_{1и}^*(x)} \right] - \text{погрешность из-за отличия } T_1^*(x) \text{ от } T_{1и}^*(x) (T_1^*(x) = T_{1и}^*(x) + \Delta T_1^*(x));$

$\Delta_{R_{x1}} \lambda_j^* = \frac{k_j q_{итj} (\sqrt{2} - 1)}{\pi T_{1j}^*(x)} \left[ \frac{1}{2\sqrt{2}(R_{x1и} + \Delta R_{x1}) - R_{x2j}} - \frac{1}{2\sqrt{2} R_{x1и} - R_{x2j}} \right] - \text{погрешность из-за отличия } R_{x1} \text{ от } R_{x1и} (R_{x1} = R_{x1и} + \Delta R_{x1});$

$\Delta_{R_{x2}} \lambda_j^* = \frac{k_j q_{итj} (\sqrt{2} - 1)}{\pi T_{1j}^*(x)} \left[ \frac{1}{2\sqrt{2} R_{x1j} - R_{x2и} - \Delta R_{x2}} - \frac{1}{2\sqrt{2} R_{x1j} - R_{x2и}} \right] - \text{погрешность из-за отличия } R_{x2} \text{ от } R_{x2и} (R_{x2} = R_{x2и} + \Delta R_{x2});$

Таблица 3.2

Параметр	$V$	$R_1$	$x_1$	$R_{x1}$	$q_{ит}$	$T_1^*(x)$	$R_{x2}$
Максимальное отклонение, %	$\delta a$	10	49,71	24,14	12,99	—	—
	$\delta \lambda$	—	—	—	51,84	10	11,11

$\Delta_k \lambda_j^* = \frac{\Delta k q_{итj} (\sqrt{2} - 1)}{\pi T_{1j}^*(x) [2\sqrt{2} R_{x1j} - R_{x2j}]} - \text{погрешность из-за отличия } k \text{ от } k_н (k = k_н + \Delta k).$

Полученные для компонент соотношения позволяют оценить характеристики этих компонент, выделить доминанты и определить характеристики полных погрешностей  $\Delta a_j^*$  и  $\Delta \lambda_j^*$  [54]. Результаты выделения доминирующих составляющих в общей погрешности измерения ТФС материалов представлены в табл. 3.2.

При анализе характеристик  $\Delta a_j^*$  и  $\Delta \lambda_j^*$  получается, что ансамбль измерительных экспериментов относится к определению ТФС различных материалов в различных условиях, когда величины  $V$ ,  $R_1$ ,  $x_1$ ,  $R_{x1}$ ,  $R_{x2}$ ,  $q_{ит}$ ,  $T_1^*(x)$ ,  $k$  случайны.

Анализ исходных данных и расчет с использованием полученных аналитических соотношений (3.38), (3.39) показывают, что из четырех компонент  $a$  доминируют  $R_1$  и  $x_1$ , далее  $R_{x1}$  и  $V$ . Для  $\lambda$  доминирует  $R_{x1}$ , далее по степени значимости следуют  $R_{x2}$ ,  $T_1^*(x)$ ,  $k$  и  $q_{ит}$ .

Полученная информация о доминирующих компонентах и их вкладе в общую погрешность контроля ТФС исследуемых двухслойных строительных конструкций и изделий позволяет провести коррекцию результатов измерения, а в теплофизическом эксперименте целенаправленно воздействовать на источники этих доминирующих составляющих общей погрешности.

### 3.3. АНАЛИЗ ПОГРЕШНОСТИ АДАПТИВНОГО ПО ЭНЕРГЕТИЧЕСКИМ ПАРАМЕТРАМ БЕСКОНТАКТНОГО МЕТОДА НК ТФС ДВУХСЛОЙНЫХ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Для бесконтактного метода НК ТФС двухслойных строительных конструкций искомые свойства определяются в соответствии с соотношениями (2.41) и (2.44). Для удобства вывода аналитических выражений, описывающих компоненты общей погрешности, обозначим в этих соотношениях  $T_{зад}$  через  $T_1$ ,  $T(R_2)$  через  $T_2$ ,  $\tau_{имп} q_{ит} = Q_{и}$  и зададим условие, что  $2R_1 = R_2$ . Последнее условие не будет оказывать влияния на анализ погрешностей разработанного метода через выделение доминант среди составляющих общей погрешности контроля. Тогда уравнения измерений коэффициентов температуропроводности  $a$  и теплопроводности  $\lambda$  имеют следующий вид:

$$a_j^* = \frac{V(R_2 - x_2)}{2 \ln \left[ 2 \frac{T_{1j}^*}{T_{2j}^*} \right]}; \quad (3.40)$$

$$\lambda_j^* = \frac{k_j^* F_{2j}^* Q_{\text{н}} \left( \sqrt{F_{2j}^*/F_{1j}^*} - 1 \right)}{2\pi R_1 T_1 \left[ (F_{2j}^*/F_{1j}^*)^{3/2} - 2 \right]}, \quad (3.40)$$

где  $F_1, F_2$  – частоты тепловых импульсов, при которых температура в точках контроля равна соответственно  $T_1$  и  $T_2$ .

Рассмотрим уравнение (3.40). Его структура показывает, что полная погрешность  $\Delta a_j^*$  зависит от точности установления  $V, R_1, x_2, T_1$ , а также от точности измерений  $T_2$ . Следовательно,

$$\Delta a_j^* = a_j^* - a_j = \Delta_V a_j^* + \Delta_{R_2} a_j^* + \Delta_{x_2} a_j^* + \Delta_{T_1} a_j^* + \Delta_{T_2} a_j^*, \quad (3.42)$$

где  $\Delta_V a_j^* = \frac{\Delta V (R_2 - x_2)}{2 \ln \left[ 2 \frac{T_{1j}}{T_{2j}} \right]}$  – погрешность, обусловленная отличием  $V$  от истинного значения  $V_{\text{н}}$ , т.е.  $V = V_{\text{н}} + \Delta V$ ;

$\Delta_{R_2} a_j^* = \frac{V \Delta R_2}{2 \ln \left[ 2 \frac{T_{1j}}{T_{2j}} \right]}$  – погрешность, обусловленная отличием  $R_2$  от  $R_{2\text{н}}$  ( $R_2 = R_{2\text{н}} + \Delta R_2$ );

$\Delta_{x_2} a_j^* = -\frac{V \Delta x_2}{2 \ln \left[ 2 \frac{T_{1j}}{T_{2j}} \right]}$  – погрешность, обусловленная отличием  $x_2$  от  $x_{2\text{н}}$  ( $x_2 = x_{2\text{н}} + \Delta x_2$ );

$\Delta_{T_1} a_j^* = \frac{V(R_2 - x_2)}{2} \left[ \frac{1}{\ln \left[ 2 \frac{T_{1\text{н}} + \Delta T_1}{T_{2j}} \right]} - \frac{1}{\ln \left[ 2 \frac{T_{1\text{н}}}{T_{2j}} \right]} \right]$  – погрешность, обусловленная отличием  $T_1$  от  $T_{1\text{н}}$  ( $T_1 = T_{1\text{н}} + \Delta T_1$ );

$\Delta_{T_2} a_j^* = \frac{V(R_2 - x_2)}{2} \left[ \frac{1}{\ln \left[ 2 \frac{T_{1j}}{T_{2\text{н}} + \Delta T_2} \right]} - \frac{1}{\ln \left[ 2 \frac{T_{1j}}{T_{2\text{н}}} \right]} \right]$  – погрешность, обусловленная отличием  $T_2$  от  $T_{2\text{н}}$  ( $T_2 = T_{2\text{н}} + \Delta T_2$ ).

Рассмотрим далее уравнение (3.41). Его структура показывает, что полная погрешность  $\Delta \lambda_j^*$  зависит от точности установления  $k, Q_{\text{н}}, R_1$ , а также от точности измерений  $T_1, F_1, F_2$ . Следовательно,

$$\Delta \lambda_j^* = \Delta_k \lambda_j^* + \Delta_{Q_{\text{н}}} \lambda_j^* + \Delta_{R_1} \lambda_j^* + \Delta_{T_1} \lambda_j^* + \Delta_{F_1} \lambda_j^* + \Delta_{F_2} \lambda_j^*, \quad (3.43)$$

где  $\Delta_k \lambda_j^* = \frac{\Delta k F_{2j} Q_{\text{н}} \left( \sqrt{F_{2j}/F_{1j}} - 1 \right)}{\pi R_1 T_1 \left[ (F_{2j}/F_{1j})^{3/2} - 2 \right]}$  – погрешность из-за отличия  $k$  от  $k_{\text{н}}$  ( $k = k_{\text{н}} + \Delta k$ );

$\Delta_{Q_{\text{н}}} \lambda_j^* = \frac{k_j \Delta Q_{\text{н}} F_{2j} Q_{\text{н}} \left( \sqrt{F_{2j}/F_{1j}} - 1 \right)}{\pi R_1 T_1 \left[ (F_{2j}/F_{1j})^{3/2} - 2 \right]}$  – погрешность из-за отличия  $Q_{\text{н}}$  от  $Q_{\text{н}}^{\text{н}}$  ( $Q_{\text{н}} = Q_{\text{н}}^{\text{н}} + \Delta Q_{\text{н}}$ );

$\Delta_{T_1} \lambda_j^* = \frac{k_j F_{2j} Q_{\text{н}} \left( \sqrt{F_{2j}/F_{1j}} - 1 \right)}{\pi R_1 \left[ (F_{2j}/F_{1j})^{3/2} - 2 \right]} \left[ \frac{1}{T_{1\text{н}} + \Delta T_1} - \frac{1}{T_{1\text{н}}} \right]$  – погрешность из-за отличия  $T_1$  от  $T_{1\text{н}}$  ( $T_1 = T_{1\text{н}} + \Delta T_1$ );

$\Delta_{F_1} \lambda_j^* = \frac{k_j F_{2j} Q_{\text{н}}}{\pi R_1 T_1} \left[ \frac{\sqrt{\frac{F_{2j}}{F_{1\text{н}} + \Delta F_1}} - 1}{\left( \frac{F_{2j}}{F_{1\text{н}} + \Delta F_1} \right)^{3/2} - 2} - \frac{\sqrt{\frac{F_{2j}}{F_{1\text{н}}}} - 1}{\left( \frac{F_{2j}}{F_{1\text{н}}} \right)^{3/2} - 2} \right]$  – погрешность из-за отличия  $F_1$  от  $F_{1\text{н}}$  ( $F_1 = F_{1\text{н}} + \Delta F_1$ );

$\Delta_{F_2} \lambda_j^* = \frac{k_j Q_{\text{н}}}{\pi R_1 T_1} \left[ \frac{(F_{2\text{н}} + \Delta F_2) \left( \sqrt{\frac{F_{2\text{н}} + \Delta F_2}{F_{1j}}} - 1 \right)}{\left( \frac{F_{2\text{н}} + \Delta F_2}{F_{1j}} \right)^{3/2} - 2} - \frac{F_{2\text{н}} \left( \sqrt{\frac{F_{2j}}{F_{1\text{н}}}} - 1 \right)}{\left( \frac{F_{2\text{н}}}{F_{1j}} \right)^{3/2} - 2} \right]$  – погрешность из-за отличия  $F_2$  от  $F_{2\text{н}}$  ( $F_2 = F_{2\text{н}} + \Delta F_2$ ).

Таблица 3.3

Параметр	$Q_{\text{и}}$	$K$	$V$	$R_1$	$R_2$	$T_1$	$T_2$	$F_1$	$F_2$	$X_2$
Максимальное отклонение, %	$\delta a$	–	10	–	49	37	142	–	–	24
	$\delta \lambda$	10	10	–	9	–	9	–	50	15

Полученные для компонент соотношения позволяют оценить характеристики введенных компонент, выделить доминанты и определить характеристики полных погрешностей  $\Delta a_j^*$  и  $\Delta \lambda_j^*$  [55]. Результаты выделения доминирующих составляющих в общей погрешности измерения ТФС материалов представлены в табл. 3.3.

Анализ исходных данных и расчет на основе полученных аналитических соотношений (3.42), (3.43) показывают, что из пяти компонент теплопроводности  $a$  доминируют  $T_2$  и  $R_2$ , далее  $T_1$  и  $x_2$ .

Для теплопроводности  $\lambda$  доминируют  $F_1$  и  $F_2$ , далее по степени значимости следуют  $k$ ,  $Q_{\text{и}}$ ,  $T_1$  и  $R_1$ .

Полученная информация о доминирующих компонентах и их вкладе в общую погрешность контроля ТФС исследуемых двухслойных строительных конструкций позволяет провести коррекцию результатов измерения, а в теплофизическом эксперименте целенаправленно воздействовать на источники этих составляющих общей погрешности.

### 3.4. АНАЛИЗ ПОГРЕШНОСТИ МЕТОДА НК ТФС ТРЕХСЛОЙНЫХ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОМБИНАЦИИ КОНТАКТНОГО И БЕСКОНТАКТНОГО ТЕПЛОВЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА ИССЛЕДУЕМЫЙ ОБЪЕКТ

Для комбинированного метода НК ТФС наружных слоев трехслойного изделия, рассмотренного в разделе 2.4, уравнения для определения коэффициентов теплопроводности  $a$  и теплопроводности  $\lambda$  имеют следующий вид:

$$a_j^* = \frac{VR_1}{2 \ln 2 \frac{Q_{x1j}^*}{Q_{x2}^*}}, \quad (3.44)$$

$$\lambda_j^* = \frac{F_{\text{имп}} Q_{x1j}^*}{2\pi T(R_1)_j^* R_1} \exp\left(-\frac{V(R_1 - x_1)}{2a_j^*}\right). \quad (3.45)$$

Рассмотрим уравнение (3.44). Его структура показывает, что полная погрешность  $\Delta a_j^*$  зависит от точности установления  $V$ ,  $R_1$ ,  $x_1$ ,  $Q_{x1}$ ,  $Q_{x2}$ . Следовательно,

$$\Delta a_j^* = a_j^* - a_j = \Delta_V a_j^* + \Delta_{R_1} a_j^* + \Delta_{x_1} a_j^* + \Delta_{Q_{x1}} a_j^* + \Delta_{Q_{x2}} a_j^*, \quad (3.46)$$

где  $\Delta_V a_j^* = \frac{\Delta VR_1}{2 \ln 2 \frac{Q_{x1}}{Q_{x2}}}$  – погрешность, обусловленная отличием  $V$  от истинного значения  $V_{\text{и}}$ , т. е.  $V = V_{\text{и}} + \Delta V$ ;

$\Delta_{R_1} a_j^* = \frac{\Delta R_1 V}{2 \ln 2 \frac{Q_{x1}}{Q_{x2}}}$  – погрешность, обусловленная отличием  $R_1$  от  $R_{1\text{и}}$  ( $R_1 = R_{1\text{и}} + \Delta R_1$ );

$\Delta_{Q_{x1}} a_j^* = \frac{VR_1}{2} \left[ \frac{1}{\ln\left(\frac{2Q_{x1\text{и}} + \Delta Q_{x1}}{Q_{x2}}\right)} - \frac{1}{\ln\left(\frac{2Q_{x1\text{и}}}{Q_{x2}}\right)} \right]$  – погрешность, обусловленная отличием  $Q_{x1}$  от  $Q_{x1\text{и}}$  ( $Q_{x1} = Q_{x1\text{и}} + \Delta Q_{x1}$ );

$\Delta_{Q_{x2}} a_j^* = \frac{VR_1}{2} \left[ \frac{1}{\ln\left(\frac{2Q_{x1}}{Q_{x2\text{и}} + \Delta Q_{x2}}\right)} - \frac{1}{\ln\left(\frac{2Q_{x1}}{Q_{x2\text{и}}}\right)} \right]$  – погрешность, обусловленная отличием  $Q_{x2}$  от  $Q_{x2\text{и}}$  ( $Q_{x2} = Q_{x2\text{и}} + \Delta Q_{x2}$ ).

Рассмотрим уравнение (3.45). Его структура показывает, что полная погрешность  $\Delta \lambda_j^*$  зависит от точности установления  $F_{\text{имп}}$ ,  $V$ ,  $R_1$ ,  $x_1$ , а также от точности измерений  $Q_{x1}$ ,  $T(R_1)$ ,  $a$ . Следовательно,

$$\Delta \lambda_j^* = \Delta_{F_{\text{имп}}} \lambda_j^* + \Delta_{Q_{x1}} \lambda_j^* + \Delta_V \lambda_j^* + \Delta_{R_1} \lambda_j^* + \Delta_{x_1} \lambda_j^* + \Delta_{T(R_1)} \lambda_j^* + \Delta_a \lambda_j^*, \quad (3.47)$$



где  $\Delta_{F_{\text{имп}}} \lambda_j^* = \frac{\Delta F_{\text{имп}} Q_{x1}}{2\pi T(R_1) R_1} \exp\left(-\frac{V(R_1 - x_1)}{2a}\right)$  – погрешность, обусловленная отличием  $F_{\text{имп}}$  от истинного значения  $F_{\text{имп. и}}$ , т.е.

$$F_{\text{имп}} = F_{\text{имп. и}} + \Delta F_{\text{имп}};$$

$\Delta_{Q_{x1}} \lambda_j^* = \frac{\Delta Q_{x1} F_{\text{имп}}}{2\pi T(R_1) R_1} \exp\left(-\frac{V(R_1 - x_1)}{2a}\right)$  – погрешность, обусловленная отличием  $Q_{x1}$  от истинного значения  $Q_{x1\text{и}}$ , т.е.  $Q_{x1} =$

$$Q_{x1\text{и}} + \Delta Q_{x1};$$

$\Delta_V \lambda_j^* = \frac{F_{\text{имп}} Q_{x1}}{2\pi T(R_1) R_1} \left\{ \exp\left(-\frac{V(V_{\text{и}} + \Delta V)(R_1 - x_1)}{2a}\right) - \exp\left(-\frac{V_{\text{и}}(R_1 - x_1)}{2a}\right) \right\}$  – погрешность, обусловленная отличием  $V$  от  $V_{\text{и}}$  ( $V =$

$$V_{\text{и}} + \Delta V);$$

$\Delta_{R_1} \lambda_j^* = \frac{F_{\text{имп}} Q_{x1}}{2\pi T(R_1)(R_{1\text{и}} + \Delta R_1)} \left[ \exp\left(-\frac{V(R_{1\text{и}} + \Delta R_1 - x_1)}{2a}\right) \right] - \frac{F_{\text{имп}} Q_{x1}}{2\pi T(R_1) R_{1\text{и}}} \times \left[ \exp\left(-\frac{V(R_{1\text{и}} - x_1)}{2a}\right) \right]$  – погрешность из-за отли-

чия  $R_1$  от  $R_1$  ( $R_1 = R_{1\text{и}} + \Delta R_1$ );

$\Delta_{x_1} \lambda_j^* = \frac{F_{\text{имп}} Q_{x1}}{2\pi T(R_1) R_1} \left[ \exp\left(-\frac{V(R_1 - x_{1\text{и}} - \Delta x_1)}{2a}\right) \right] - \frac{F_{\text{имп}} Q_{x1}}{2\pi T(R_1) R_1} \times \left[ \exp\left(-\frac{V(R_1 - x_{1\text{и}})}{2a}\right) \right]$  – погрешность из-за отличия  $x_1$  от

$$x_{1\text{и}} \quad (x_1 = x_{1\text{и}} + \Delta x_1);$$

$\Delta_{Q_{x1}} \lambda_j^* = \frac{Q_{x1} F_{\text{имп}}}{2\pi R_1} \left( \frac{1}{T_{\text{и}}(R_1) - \Delta T(R_1)} - \frac{1}{T_{\text{и}}(R_1)} \right) \exp\left(-\frac{V(R_1 - x_1)}{2a}\right)$  – погрешность из-за отличия  $T(R_1)$  от  $T_{\text{и}}(R_1)$  ( $T(R_1) = T_{\text{и}}(R_1) - \Delta T(R_1)$ );

$\Delta_{Q_{x1}} \lambda_j^* = \frac{Q_{x1} F_{\text{имп}}}{2\pi T(R_1) R_1} \left[ \exp\left(-\frac{V(R_1 - x_1)}{2(a_{\text{и}} + \Delta a)}\right) - \exp\left(-\frac{V(R_1 - x_1)}{2a_{\text{и}}}\right) \right]$  – погрешность, обусловленная отличием  $a$  от  $a_{\text{и}}$  ( $a = a_{\text{и}} + \Delta a$ ).

Полученные для компонент соотношения позволяют оценить характеристики введенных компонент, выделить доминанты и определить характеристики полных погрешностей  $\Delta a_j^*$  и  $\Delta \lambda_j^*$  [56].

Анализ исходных данных и расчет показывают (см. табл. 3.4.), что из пяти компонент  $a$  доминируют  $V$  и  $R_1$ , далее  $Q_{x1}$  и  $Q_{x2}$ . Для  $\lambda$  доминируют  $R_1, x_1$ , далее по степени значимости следуют  $F_{\text{имп}}, Q_{x1}, T(R_1), V$  и  $a$ .

Анализ погрешностей определения ТФС внутреннего слоя трехслойного изделия производится по соотношениям, приведенным в разделе 3.1.

Полученная информация о доминирующих компонентах и их вкладе в общую погрешность позволяет показать их влияние на результат эксперимента, целенаправленно влияя на источники погрешности.

Таблица 3.4

Параметр		$R_1$	$x_1$	$V$	$F_{\text{имп}}$	$Q_{x1}$	$Q_{x2}$	$T(R_1)$	$a$
Максимальное отклонение, %	$\delta a$	10	–	10	–	6,4	7,3	–	–
	$\delta \lambda$	20	14	0,5	10	10	–	9	0,5

### 3.5. АНАЛИЗ ПОГРЕШНОСТИ МЕТОДА БЕСКОНТАКТНОГО НК ТФС ДВУХСЛОЙНЫХ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ С НЕПОДВИЖНЫМ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫМ ЗОНДОМ

Для бесконтактного метода НК ТФС двухслойных строительных конструкций, рассмотренного в разделе 2.5, уравнения измерения коэффициентов температуропроводности  $a$  и теплопроводности  $\lambda$  имеют следующий вид:

$$a_j^* = \frac{1}{\pi \tau_1} \left( \frac{R_1 R_2 (T_{1j}^* - T_{2j}^*)}{R_1 T_{1j}^* - R_2 T_{2j}^*} \right)^2; \quad (3.48)$$

$$\lambda_j^* = \frac{k_j^* q_{\text{ит}} \left( \frac{\tau_{xj}^*}{\tau_1} - 1 \right)}{4\pi R_2 \left( \frac{\frac{\tau_{xj}^*}{\tau_1} T_{2j}^*}{\left( 1 - \frac{R_2}{\sqrt{\pi a_j^* \tau_1}} \right)} - \frac{T_{2\text{зад}}}{\left( 1 - \frac{R_2}{\sqrt{\pi a_j^* \tau_{xj}^*}} \right)} \right)}. \quad (3.49)$$

Рассмотрим выражение (3.48). Полная погрешность определения температуропроводности  $\Delta a^*$  зависит от точности определения всех изменяющихся в процессе измерений величин, входящих в это выражение. Таким образом, полная погреш-

ность  $\Delta a^*$  складывается из суммы погрешностей:

$$\Delta a_j^* = a_j^* - a = \Delta_{R_1} a_j^* + \Delta_{R_2} a_j^* + \Delta_{T_1} a_j^* + \Delta_{T_2} a_j^* + \Delta_{\tau_1} a_j^*, \quad (3.50)$$

где  $a$  – истинное значение коэффициента температуропроводности;  $a_j^*$  – значение коэффициента температуропроводности, полученное в результате измерений;

$$\Delta_{R_1} a_j^* = \frac{(\Delta R_1)^2}{\pi \tau_1} \left( \left( \frac{R_2(T_1 - T_2)}{(R_1^H + \Delta R_1)T_1 - R_2 T_2} \right)^2 - \left( \frac{R_2(T_1 - T_2)}{R_1^H T_1 - R_2 T_2} \right)^2 \right) - \text{погрешность, обусловленная отличием } R_1 \text{ от истинного значения}$$

ния  $R_1^H$ , т.е.  $R_1 = R_1^H + \Delta R_1$ ;

$$\Delta_{R_2} a_j^* = \frac{(\Delta R_2)^2}{\pi \tau_1} \left( \left( \frac{R_1(T_1 - T_2)}{R_1 T_1 - (R_2^H + \Delta R_2) \cdot T_2} \right)^2 - \left( \frac{R_1(T_1 - T_2)}{R_1 T_1 - R_2^H T_2} \right)^2 \right) - \text{погрешность, обусловленная отличием } R_2 \text{ от истинного значения}$$

ния  $R_2^H$ , т.е.  $R_2 = R_2^H + \Delta R_2$ ;

$$\Delta_{T_1} a_j^* = \frac{1}{\pi \tau_1} \left( \left( \frac{R_1 R_2 (T_1^H + \Delta T_1 - T_2)}{R_1 (T_1^H + \Delta T_1) - R_2 T_2} \right)^2 - \left( \frac{R_1 R_2 (T_1^H - T_2)}{R_1 T_1^H - R_2 T_2} \right)^2 \right) - \text{погрешность, обусловленная отличием } T_1 \text{ от истинного значения}$$

$T_1^H$ , т.е.  $T_1 = T_1^H + \Delta T_1$ ;

$$\Delta_{T_2} a_j^* = \frac{1}{\pi \tau_1} \left( \left( \frac{R_1 R_2 (T_1 - (T_2^H + \Delta T_2))}{R_1 T_1 - R_2 (T_2^H + \Delta T_2)} \right)^2 - \left( \frac{R_1 R_2 (T_1 - T_2^H)}{R_1 T_1 - R_2 T_2^H} \right)^2 \right) - \text{погрешность, обусловленная отличием } T_2 \text{ от истинного значения}$$

ния  $T_2^H$ , т.е.  $T_2 = T_2^H + \Delta T_2$ ;

$$\Delta_{\tau_1} a_j^* = \frac{1}{\pi \Delta \tau_1} \left( \frac{R_1 R_2 (T_1 - T_2)}{R_1 T_1 - R_2 T_2} \right)^2 - \text{погрешность, обусловленная отличием } \tau_1 \text{ от истинного значения } \tau_1^H, \text{ т.е. } \tau_1 = \tau_1^H + \Delta \tau_1.$$

Рассмотрим далее выражение (3.49). Полная погрешность  $\Delta \lambda_j^*$  также складывается из суммы погрешностей входящих в это выражение величин:

$$\Delta \lambda_j^* = \lambda_j^* - \lambda = \Delta_{T_2} \lambda_j^* + \Delta_{T_{2\text{зад}}} \lambda_j^* + \Delta_{\tau_1} \lambda_j^* + \Delta_{\tau_x} \lambda_j^* + \Delta_k \lambda_j^* + \Delta_{q_{\text{ит}}} \lambda_j^* + \Delta_{R_2} \lambda_j^*, \quad (3.51)$$

где  $\lambda$  – истинное значение коэффициента теплопроводности;  $\lambda_j^*$  – значение коэффициента теплопроводности, полученное в результате измерений;

$$\Delta_{T_2} \lambda_j^* = \frac{kq_{\text{ит}} \left( \frac{\tau_x - 1}{\tau_1} \right)}{4\pi R_2 (A - B)} - \text{погрешность, обусловленная отличием } T_2 \text{ от истинного значения } T_2^H, \text{ т.е. } T_2 = T_2^H + \Delta T_2,$$

$$\text{где } A = \frac{\tau_x (T_2^H + \Delta T_2)}{\tau_1} - \frac{T_{2\text{зад}}}{\left( 1 - \frac{R_2}{\sqrt{\pi a \tau_1}} \right)}, \quad B = \frac{\tau_x T_2^H}{\tau_1} - \frac{T_{2\text{зад}}}{\left( 1 - \frac{R_2}{\sqrt{\pi a \tau_x}} \right)};$$

$$\Delta_{T_{2\text{зад}}} \lambda_j^* = \frac{kq_{\text{ит}} \left( \frac{\tau_x - 1}{\tau_1} \right)}{4\pi R_2 (A - B)} - \text{погрешность, обусловленная отличием } T_{2\text{зад}} \text{ от истинного значения } T_{2\text{зад}}^H, \text{ т.е. } T_{2\text{зад}} = T_{2\text{зад}}^H + \Delta T_{2\text{зад}},$$

$$\text{где } A = \frac{\tau_x T_2}{\tau_1} - \frac{T_{2\text{зад}}^H + \Delta T_{2\text{зад}}}{\left( 1 - \frac{R_2}{\sqrt{\pi a \tau_1}} \right)}, \quad B = \frac{\tau_x T_2^H}{\tau_1} - \frac{T_{2\text{зад}}^H}{\left( 1 - \frac{R_2}{\sqrt{\pi a \tau_x}} \right)};$$

$$\Delta_{\tau_1} \lambda_j^* = \frac{kq_{\text{ит}} \left( \left( \frac{\tau_x}{\tau_1^H + \Delta \tau_1} - 1 \right) - \left( \frac{\tau_x}{\tau_1^H} - 1 \right) \right)}{4\pi R_2 (A - B)} - \text{погрешность, обусловленная отличием } \tau_1 \text{ от истинного значения } \tau_1^H, \text{ т.е. } \tau_1 = \tau_1^H + \Delta \tau_1,$$

$$\text{где } A = \frac{\tau_x T_2}{\tau_1^H + \Delta \tau_1} - \frac{T_{2\text{зад}}}{\left( 1 - \frac{R_2}{\sqrt{\pi a (\tau_1^H + \Delta \tau_1)}} \right)}, \quad B = \frac{\tau_x T_2^H}{\tau_1^H} - \frac{T_{2\text{зад}}}{\left( 1 - \frac{R_2}{\sqrt{\pi a \tau_1^H}} \right)};$$

$$\Delta_{\tau_x} \lambda_j^* = \frac{kq_{\text{ит}} \left( \left( \frac{\tau_x^{\text{н}} + \Delta\tau_x}{\tau_1} - 1 \right) - \left( \frac{\tau_x^{\text{н}}}{\tau_1} - 1 \right) \right)}{4\pi R_2 (A - B)} - \text{погрешность, обусловленная отличием } \tau_x \text{ от истинного значения } \tau_x^{\text{н}}, \text{ т.е. } \tau_x = \tau_x^{\text{н}} +$$

$\Delta\tau_x$ ,

$$\text{где } A = \frac{\frac{\tau_x^{\text{н}} + \Delta\tau_x}{\tau_1} T_2}{\left( 1 - \frac{R_2}{\sqrt{\pi a \tau_1}} \right)} - \frac{T_{2\text{зад}}}{\left( 1 - \frac{R_2}{\sqrt{\pi a (\tau_x^{\text{н}} + \Delta\tau_x)}} \right)}, \quad B = \frac{\frac{\tau_x^{\text{н}}}{\tau_1} T_2}{\left( 1 - \frac{R_2}{\sqrt{\pi a \tau_1}} \right)} - \frac{T_{2\text{зад}}}{\left( 1 - \frac{R_2}{\sqrt{\pi a \tau_x^{\text{н}}}} \right)};$$

$$\Delta_k \lambda_j^* = \frac{\Delta k q_{\text{ит}} \left( \frac{\tau_x}{\tau_1} - 1 \right)}{4\pi R_2 \left( \frac{\frac{\tau_x}{\tau_1} T_2}{\left( 1 - \frac{R_2}{\sqrt{\pi a \tau_1}} \right)} - \frac{T_{2\text{зад}}}{\left( 1 - \frac{R_2}{\sqrt{\pi a \tau_x}} \right)} \right)} - \text{погрешность, обусловленная отличием } k \text{ от истинного значения } k^{\text{н}}, \text{ т.е. } k = k^{\text{н}} +$$

$\Delta k$ ;

$$\Delta_{R_2} \lambda_j^* = \frac{kq_{\text{ит}} \left( \frac{\tau_x}{\tau_1} - 1 \right)}{4\pi \Delta R_2 (A - B)} - \text{погрешность, обусловленная отличием } R_2 \text{ от истинного значения } R_2^{\text{н}}, \text{ т.е. } R_2 = R_2^{\text{н}} + \Delta R_2,$$

$$\text{где } A = \frac{\frac{\tau_x}{\tau_1} T_2}{\left( 1 - \frac{R_2^{\text{н}} + \Delta R_2}{\sqrt{\pi a \tau_1}} \right)} - \frac{T_{2\text{зад}}}{\left( 1 - \frac{R_2^{\text{н}} + \Delta R_2}{\sqrt{\pi a \tau_x}} \right)}, \quad B = \frac{\frac{\tau_x}{\tau_1} T_2}{\left( 1 - \frac{R_2^{\text{н}}}{\sqrt{\pi a \tau_1}} \right)} - \frac{T_{2\text{зад}}}{\left( 1 - \frac{R_2^{\text{н}}}{\sqrt{\pi a \tau_x}} \right)};$$

Таблица 3.5

Параметр		$R_1$	$R_2$	$q_{\text{ит}}$	$k$	$T_1$	$T_2$	$T_{2\text{зад}}$
Максимальное отклонение, %	$\delta a$	17	17	–	–	26	46	–
	$\delta \lambda$	–	27	10	10	–	31	52

$$\Delta_{q_{\text{ит}}} \lambda_j^* = \frac{k \Delta q_{\text{ит}} \left( \frac{\tau_x}{\tau_1} - 1 \right)}{4\pi R_2 \left( \frac{\frac{\tau_x}{\tau_1} T_2}{\left( 1 - \frac{R_2}{\sqrt{\pi a \tau_1}} \right)} - \frac{T_{2\text{зад}}}{\left( 1 - \frac{R_2}{\sqrt{\pi a \tau_x}} \right)} \right)} - \text{погрешность, обусловленная отличием } q_{\text{ит}} \text{ от истинного значения } q_{\text{ит}}^{\text{н}}, \text{ т.е. } q_{\text{ит}}$$

$$= q_{\text{ит}}^{\text{н}} + \Delta q_{\text{ит}}.$$

Полученные соотношения для составляющих полной погрешности позволили выделить из них доминанты [57]. Результаты выделения доминирующих составляющих в общей погрешности измерения ТФС материалов доминант представлены в табл. 3.5.

Анализ табл. 3.5 показывает, что доминирующий вклад в общую погрешность определения ТФС (как  $a$ , так и  $\lambda$ ) в разработанном методе вносят погрешности измерения температуры, причем больший вклад вносит погрешность определения температуры в точке, расположенной на большем расстоянии ( $R_2$ ) от центра пятна нагрева.

Полученная информация о доминирующих компонентах и их вкладе в общую погрешность позволяет целенаправленно компенсировать источники составляющих погрешности. Из приведенного анализа можно сделать вывод, что для уменьшения погрешности определения искомым ТФС материалов особое внимание необходимо уделить выбору термоприемников, которые должны иметь достаточно высокую точность измерения температуры.

### 3.6. АНАЛИЗ ПОГРЕШНОСТИ МЕТОДА БЕСКОНТАКТНОГО НК КАЧЕСТВА МНОГОСЛОЙНЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Измерение температуры с помощью оптико-электронных систем является косвенным методом определения указанного параметра. На параметры потока излучения, кроме температуры объекта, оказывают влияние следующие факторы:

- излучательная способность объекта, зависящая от оптических свойств, вида механической обработки, степени шероховатости и т.д.;
- поглощение излучения промежуточной средой;

в) отраженные объектом излучения сторонних источников излучения.

Погрешность, обусловленная отраженным объектом излучением сторонних источников излучения, может быть значительной при измерении температуры объекта, обладающего высоким значением коэффициента отражения, главным образом, зеркального. Расчет величины этого вида погрешности обычно затруднен, так как кроме величины коэффициента отражения объекта в данном направлении, необходимо знать степень освещенности объекта от постороннего источника излучения.

Погрешность, обусловленная поглощением излучения промежуточной средой вследствие наличия в объеме между термодатчиком и объектом взвешенных частиц, также может быть значительной. Оценка этой погрешности затруднена. Для этого нужно знать суммарный коэффициент ослабления слоя воздуха для данной длины волны, что в производственных условиях определить трудно.

В работе [58] приводится спектральный коэффициент поглощения для такой среды, равный

$$k(\lambda) = \frac{\mu_k}{\vartheta} k(r_0), \quad (3.52)$$

где  $\mu_k$  – концентрация поглощающих частиц;  $\vartheta$  – плотность частиц;  $k(r_0)$  – функция, определяемая оптическими размерами частиц, значения которых составляют от единиц до десятков микрометров.

При больших значениях  $r_0$  величина  $k(\lambda_{\text{изл}})$  стабилизируется и перестает зависеть от оптического диаметра частиц. Оптический радиус определяется как геометрическими размерами частицы, так и длиной волны излучения и физическими свойствами частиц (его комплексным показателем преломления).

По мере увеличения размеров частиц или уменьшения длины волны падающего излучения дифракционные явления на частицах ослабевают и при  $2r/\lambda_{\text{изл}} \rightarrow \infty$  частицы по своим оптическим свойствам становятся эквивалентными системе больших непрозрачных экранов, подчиняющихся законам геометрической оптики.

В работе [59] получено аналитическое выражение, связывающее оптико-теплофизические свойства вещества с измеряемыми в эксперименте величинами. Для случая  $R = 0$  это выражение имеет вид:

$$\Delta T = \frac{qL}{\lambda \left\{ 1 + \frac{8n^2\sigma_0 T_0^3}{k\lambda} [E_4(0) - E_4(kL)] \right\}}, \quad (3.53)$$

где  $R$  – коэффициент отражения;  $n$  – средний показатель преломления вещества;  $k$  – средний коэффициент поглощения;  $\sigma_0$  – постоянная Стефана-Больцмана;  $T_0$  – температура;  $E_4(x)$  – интегроэкспоненциальная функция 4-го порядка;  $L$  – толщина лучепрозрачной среды.

Если  $R \neq 0$ , то вместо выражения в квадратных скобках в знаменателе формулы (3.53) следует вычислять [60] другое выражение:

$$\sum_{n=0}^{\infty} R^{2n} [E_4(0) - E_4(kH + nkH)]. \quad (3.54)$$

При  $k \rightarrow 0$ , что соответствует полной лучепрозрачности среды, учитывая

$$\lim_{k \rightarrow 0} \frac{E_4(0) - E_4(kL)}{k} = \lim_{k \rightarrow 0} LE_3(kL) = L/2,$$

из формулы (3.53) находим следующее выражение для полного потока энергии:

$$q = \lambda_{\text{изл}} \frac{\Delta T}{L} + 4n^2\sigma_0 T_0^3 \Delta T, \quad (3.55)$$

где первое слагаемое определяет поток энергии вследствие теплопроводности, а второе – лучистый поток между двумя абсолютно черными поверхностями, разделенными непоглощающей средой с показателем преломления  $n$ .

При  $k = \text{const}$ ,  $E_4(0) = 1/3$  и  $E_4(kL) \rightarrow 0$  из выражения (3.53) получаем

$$\Delta T = \frac{qL}{\lambda + \frac{8}{3} \frac{n^2\sigma_0 T_0^3}{k}}. \quad (3.56)$$

Расчеты по (3.55) и (3.56) показали, что при длине волн от 2 до 20 микрометров для пироэлектрического модуля ПМ-4, используемого в качестве термодатчика инфракрасного излучения, погрешность не превышает 1,2 %.

Для оценки случайной составляющей общей погрешности измерения толщины слоев биметалла на основе разработанной микропроцессорной системы проводился ряд измерений на эталонных образцах из биметалла, имеющих геометрические размеры  $200 \times 200$  мм и толщину антифрикционного сплава АО20-1 400, 500, 600, 700 и 800 мкм.

Оценка доверительного интервала для случайных величин  $\delta_1$  проводится с использованием распределения Стьюдента [61]:

$$m_x - t_{1-p, N-1} \frac{\sigma_x}{\sqrt{N}} \leq x \leq m_x + t_{1-p, N-1} \frac{\sigma_x}{\sqrt{N}}, \quad (3.57)$$

где  $m_x$ ,  $\sigma_x$  – соответственно математическое ожидание и среднее квадратическое отклонение случайной величины  $x$ ;  $t_{1-p, N-1}$  – коэффициент Стьюдента, выбираемый в зависимости от уровня доверительной вероятности  $p$  и числа измерений  $N$ .

В соответствии с (3.57) доверительные интервалы для  $d_1$  с доверительной вероятностью  $p = 0,95$ ,  $N = 10$  составят соответственно  $396 \leq d_1 \leq 404$ ;  $495 \leq d_1 \leq 505$ ;  $595 \leq d_1 \leq 606$ ;  $696 \leq d_1 \leq 710$ ;  $793 \leq d_1 \leq 812$ .

Максимальная случайная погрешность измерения  $d_1$  не превышает 6 % в диапазоне толщин 0,4 – 0,8 мм с доверительной вероятностью  $p = 0,95$ .

### 3.7. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ МЕТОДОВ И СИСТЕМ НК ТФС МНОГОСЛОЙНЫХ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ И ИЗДЕЛИЙ

Основным источником информации о погрешностях и характеристиках погрешностей результатов измерений является метрологический эксперимент [11]. В основе метрологического эксперимента лежит сравнение результата, полученного с помощью испытываемого (поверяемого) измерительного средства, с результатами, установленными с помощью образцового измерительного средства. Последнее характеризуется более высокой гарантированной точностью, чем проверяемые. В теплофизических измерениях в качестве образцового средства используется источник известного значения измеряемой величины (мера) – эталонный образец, который воспроизводит требуемое значение измеряемой величины с необходимой точностью. В качестве образцов для проведения метрологического эксперимента использовались материалы, ТФС которых известны и аттестованы во Всероссийском Научно-исследовательском институте физико-технических и радиотехнических измерений им. Д.И. Менделеева. Одними из таких материалов в экспериментах по определению погрешностей и их характеристик при измерении ТФС были полиметилметакрилат (ПММ) ТУ № 26-54, рипор, стекло ТФ-1 ГОСТ 15130–69. Эти материалы были выбраны в качестве объекта исследования в связи с тем, что их ТФС в настоящее время хорошо изучены и рекомендованы в качестве стандартных образцов с допуском  $\pm(3...4)$  % для поверки и тарировки приборов и систем измерений ТФС.

В качестве нормативного документа для оценки погрешностей и их характеристик использована методика поверки рабочих средств измерений МИ 115–77, а также методические указания по определению характеристик погрешностей средств измерений в реальных условиях эксплуатации РД 50-453–84 [12], измерительные методики МИ 1317–86 и МИ 202–80. В соответствии с этими методиками в качестве основных характеристик погрешностей измерения ТФС определялись математическое ожидание (систематическая погрешность) и среднее квадратическое отклонение (СКО) случайной составляющей погрешности результата измерений. При этом математическое ожидание рассчитывается по соотношениям:

$$M[\Delta\lambda_j^*] = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \Delta\lambda_j^*, \quad M[\Delta a_j^*] = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \Delta a_j^*,$$

где  $\Delta\lambda_j^* = \lambda_j^* - \lambda_j$ ;  $\Delta a_j^* = a_j^* - a_j$ .

С учетом конечности выборки:

$$M[\Delta\lambda_j^*] = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \Delta\lambda_j^*; \quad (3.58)$$

$$M[\Delta a_j^*] = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \Delta a_j^*, \quad (3.59)$$

где  $n$  – количество измерений на одном образце (выборка).

Среднее квадратическое отклонение погрешности результатов измерения ТФС определялось соответственно из соотношений:

$$\sigma[\Delta\lambda_j^*] = \left[ \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (\Delta\lambda_j^* - M[\Delta\lambda_j^*])^2 \right]^{1/2};$$

$$\sigma[\Delta\lambda_j^*] = \left[ \frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n (\Delta\lambda_j^* - M[\Delta\lambda_j^*])^2 \right]^{1/2}; \quad (3.60)$$

$$\sigma[\Delta a_j^*] = \left[ \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (\Delta a_j^* - M[\Delta a_j^*])^2 \right]^{1/2};$$

$$\sigma[\Delta a_j^*] = \left[ \frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n (\Delta a_j^* - M[\Delta a_j^*])^2 \right]^{1/2}. \quad (3.61)$$

Характеристики относительных погрешностей результатов измерения ТФС исследуемых теплофизических образцов рассчитывались соответственно по соотношениям:

$$M[\delta\lambda_j^*] = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \delta\lambda_j^* ;$$

$$\sigma[\delta\lambda_j^*] = \left[ \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (\delta\lambda_j^* - M[\delta\lambda_j^*])^2 \right]^{1/2} ;$$

$$M^*[\delta\lambda_j^*] = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \delta\lambda_j^* ; \quad (3.62)$$

$$\sigma^*[\delta\lambda_j^*] = \left[ \frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n (\delta\lambda_j^* - M^*[\delta\lambda_j^*])^2 \right]^{1/2} ; \quad (3.63)$$

$$M^*[\delta a_j^*] = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \delta a_j^* ; \quad (3.64)$$

$$\sigma^*[\delta a_j^*] = \left[ \frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n (\delta a_j^* - M^*[\delta a_j^*])^2 \right]^{1/2} . \quad (3.65)$$

Предельные абсолютные и относительные погрешности искомых тепло- и температуропроводности определялись соответственно по соотношениям:

$$\Delta_{\text{пред}} \lambda_j^* = M[\Delta\lambda_j^*] + t_{\alpha, n-1} \sigma[\Delta\lambda_j^*] ; \quad (3.66)$$

$$\Delta_{\text{пред}} a_j^* = M[\Delta a_j^*] + t_{\alpha, n-1} \sigma[\Delta a_j^*] ; \quad (3.67)$$

$$\delta_{\text{пред}} \lambda_j^* = \frac{\Delta_{\text{пред}} \lambda_j^*}{\lambda_j} ; \quad (3.68)$$

$$\delta_{\text{пред}} a_j^* = \frac{\Delta_{\text{пред}} a_j^*}{a_j} , \quad (3.69)$$

где  $t_{\alpha, n-1}$  – коэффициент Стьюдента при доверительной вероятности  $\alpha = 0,95$  и количестве измерений  $n - 1$ .

Для проверки работоспособности разработанного контактного метода НК ТФС трехслойных изделий были проведены эксперименты на трехслойном изделии, наружные слои которого выполнены из полиметилметакрилата толщиной 20 мм, а внутренний – из рипора толщиной 30 мм. В табл. 3.6 и 3.7 приведены экспериментальные данные. Аналогичные эксперименты проводились на трехслойных изделиях, наружные слои которых выполнены из керамзитобетона, а внутренний – из пенопласта. Данные этого эксперимента приведены в табл. 3.8, 3.9.

Экспериментальная проверка показала корректность основных теоретических выводов, положенных в основу предложенного метода неразрушающего контроля ТФС многослойных конструкций без нарушения их целостности.

В табл. 3.10 – 3.15 для бесконтактных и комбинированного методов приведена обработка экспериментальных данных при исследовании двух- и трехслойных физических систем, состоящих из оргстекла и рипора, а также керамзитобетона и пенопласта. Через  $M[\Delta\lambda_j^*]$ ,  $M[\Delta a_j^*]$ ,  $\sigma[\Delta\lambda_j^*]$ ,  $\sigma[\Delta a_j^*]$  в таблицах обозначены соответственно математическое ожидание и СКО абсолютной погрешности тепло- и температуропроводности, рассчитываемые по формулам (3.58) – (3.61), через  $M[\delta\lambda_j^*]$ ,  $M[\delta a_j^*]$ ,  $\sigma[\delta\lambda_j^*]$  и  $\sigma[\delta a_j^*]$  – характеристики относительной погрешности, определяемые по формулам (3.62) – (3.65), а через  $\Delta_{\text{пред}} \lambda_j^*$ ,  $\Delta_{\text{пред}} a_j^*$ ,  $\delta_{\text{пред}} \lambda_j^*$  и  $\delta_{\text{пред}} a_j^*$  – соответственно предельные значения абсолютной и относительной погрешностей результатов измерений, определяемые по формулам (3.66) – (3.69).

Таблица 3.6

	$q_n$	$n_1$	$N_2$	$T_{\text{зад1}}$	$T_{\text{зад2}}$	$F_{x1}$	$F_{x2}$	$\lambda_{1,3}$	$a_{1,3}$	$\delta\lambda, \%$	$\delta a, \%$
Наружный слой № 1	0,5	864	3132	30	50	11,4	41,5	0,186	$1,05 \cdot 10^{-7}$	4,6	7
Наружный слой № 2	0,5	860	3126	30	50	10,2	42,3	0,187	$1,07 \cdot 10^{-7}$	4,1	5,3

Таблица 3.7

	$T_1$	$T_2$	$T_3$	$T_4$	$q_n$	$\lambda_2$	$a_2$	$\delta\lambda_2, \%$	$\delta a_2, \%$
Внутренний слой	64	60,7	25,1	21,8	32	0,026	$4,86 \cdot 10^{-7}$	3,7	5,65

Таблица 3.8

	$q_n$	$n_1$	$n_2$	$T_{\text{зад1}}$	$T_{\text{зад2}}$	$F_{x1}$	$F_{x2}$	$\lambda_{1,3}$	$a_{1,3}$	$\delta\lambda, \%$	$\delta a, \%$
Наружный слой № 1	0,5	784	2862	30	50	12,8	46,2	0,67	$7,84 \cdot 10^{-7}$	4,7	7,6
Наружный слой № 2	0,5	792	2848	30	50	11,3	41,7	0,66	$7,62 \cdot 10^{-7}$	4,4	8,3

Таблица 3.9

	$T_1$	$T_2$	$T_3$	$T_4$	$q_n$	$\lambda_2$	$a_2$	$\delta\lambda_2, \%$	$\delta a_2, \%$
Внутренний слой	62	68	29	24	32	0,052	$5,42 \cdot 10^{-7}$	4,8	7,67

Таблица 3.10

Данные обработки эксперимента (комбинированный метод)			
Метод	1-й слой: ПММ	2-й слой: рипор	3-й слой: ПММ
$M[\Delta a^*_j]$	$1,46 \cdot 10^{-9}$	$1,7 \cdot 10^{-8}$	$2,58 \cdot 10^{-10}$
$\sigma[\Delta a^*_j]$	$3,24 \cdot 10^{-9}$	$8,56 \cdot 10^{-7}$	$6,24 \cdot 10^{-9}$
$M[\delta a^*_j]$	1,29 %	3,69 %	0,22 %
$\sigma[\delta a^*_j]$	2,87 %	7,53 %	4,52 %
$\Delta_{\text{пред}} a^*_j$	$8,25 \cdot 10^{-9}$	$2,01 \cdot 10^{-8}$	$1,33 \cdot 10^{-8}$
$\delta_{\text{пред}} a^*_j$	8,3 %	13,62 %	10,78 %
$M[\Delta \lambda^*_j]$	$9,83 \cdot 10^{-3}$	$1,62 \cdot 10^{-5}$	$0,32 \cdot 10^{-3}$
$\sigma[\Delta \lambda^*_j]$	$4,00 \cdot 10^{-3}$	$2,23 \cdot 10^{-3}$	$9,85 \cdot 10^{-3}$
$M[\delta \lambda^*_j]$	5,04 %	1,1 %	0,16 %

$\sigma[\delta\lambda^*_j]$	2,05 %	8,2 %	5,05 %
$\Delta_{\text{пред}}\lambda^*_j$	$1,82 \cdot 10^{-2}$	$4,97 \cdot 10^{-3}$	$2,09 \cdot 10^{-2}$
$\delta_{\text{пред}}\lambda^*_j$	9,33 %	12,43 %	10,72 %

Таблица 3.11

Данные обработки эксперимента (комбинированный метод)			
Метод	1-й слой: керамзитобетон	2-й слой: пенопласт	3-й слой: керамзитобетон
$M[\Delta a^*_j]$	$3,20 \cdot 10^{-7}$	$7,79 \cdot 10^{-7}$	$3,20 \cdot 10^{-7}$
$\sigma[\Delta a^*_j]$	$1,12 \cdot 10^{-6}$	$5,09 \cdot 10^{-7}$	$1,09 \cdot 10^{-7}$
$M[\delta a^*_j]$	9,3 %	10,89 %	9,31 %
$\sigma[\delta a^*_j]$	2,29 %	7,54 %	1,01 %
$\Delta_{\text{пред}}a^*_j$	$3,20 \cdot 10^{-7}$	$2,84 \cdot 10^{-7}$	$3,20 \cdot 10^{-7}$
$\delta_{\text{пред}}a^*_j$	9,31 %	14,22 %	9,29 %
$M[\Delta \lambda^*_j]$	$1,65 \cdot 10^{-2}$	$3,68 \cdot 10^{-4}$	$1,99 \cdot 10^{-2}$
$\sigma[\Delta \lambda^*_j]$	$8,27 \cdot 10^{-3}$	$2,23 \cdot 10^{-3}$	$8,97 \cdot 10^{-3}$
$M[\delta \lambda^*_j]$	4,73 %	1,08 %	5,71 %
$\sigma[\delta \lambda^*_j]$	2,36 %	6,56 %	2,56 %
$\Delta_{\text{пред}}\lambda^*_j$	$3,38 \cdot 10^{-2}$	$4,29 \cdot 10^{-3}$	$3,87 \cdot 10^{-2}$
$\delta_{\text{пред}}\lambda^*_j$	9,67 %	12,62 %	11,07 %

Таблица 3.12

Данные обработки эксперимента (адаптивный метод)		
Метод	1-й слой: ПММ	2-й слой: Рипор
$M[\Delta a^*_j]$	$1,17 \cdot 10^{-8}$	$6,40 \cdot 10^{-8}$
$\sigma[\Delta a^*_j]$	$1,11 \cdot 10^{-8}$	$5,11 \cdot 10^{-8}$
$M[\delta a^*_j]$	10,39 %	13,91 %
$\sigma[\delta a^*_j]$	9,87 %	11,11 %
$\Delta_{\text{пред}}a^*_j$	$1,15 \cdot 10^{-8}$	$4,28 \cdot 10^{-8}$
$\delta_{\text{пред}}a^*_j$	10,24 %	11,30 %
$M[\Delta \lambda^*_j]$	$2,13 \cdot 10^{-3}$	$1,03 \cdot 10^{-3}$
$\sigma[\Delta \lambda^*_j]$	$9,97 \cdot 10^{-3}$	$1,59 \cdot 10^{-3}$
$M[\delta \lambda^*_j]$	1,09 %	3,85 %
$\sigma[\delta \lambda^*_j]$	5,11 %	5,89 %
$\Delta_{\text{пред}}\lambda^*_j$	$1,87 \cdot 10^{-2}$	$2,28 \cdot 10^{-3}$
$\delta_{\text{пред}}\lambda^*_j$	8,59 %	8,47 %

Таблица 3.13

Данные обработки эксперимента (адаптивный метод)		
--	--	--



Метод	1-й слой: керамзитобетон	2-й слой: пенопласт
$M[\Delta a^*_j]$	$1,62 \cdot 10^{-6}$	$6,34 \cdot 10^{-7}$
$\sigma[\Delta a^*_j]$	$9,87 \cdot 10^{-7}$	$3,81 \cdot 10^{-7}$
$M[\delta a^*_j]$	4,72 %	3,17 %
$\sigma[\delta a^*_j]$	10,87 %	9,54 %
$\Delta_{\text{пред}} a^*_j$	$4,39 \cdot 10^{-7}$	$1,63 \cdot 10^{-7}$
$\delta_{\text{пред}} a^*_j$	12,76 %	8,16 %
$M[\Delta \lambda^*_j]$	$6,63 \cdot 10^{-3}$	$5,62 \cdot 10^{-4}$
$\sigma[\Delta \lambda^*_j]$	$1,99 \cdot 10^{-2}$	$1,51 \cdot 10^{-3}$
$M[\delta \lambda^*_j]$	1,89 %	1,65 %
$\sigma[\delta \lambda^*_j]$	5,71 %	4,44 %
$\Delta_{\text{пред}} \lambda^*_j$	$3,51 \cdot 10^{-2}$	$2,59 \cdot 10^{-3}$
$\delta_{\text{пред}} \lambda^*_j$	10,04 %	7,63 %

Таблица 3.14

Данные обработки эксперимента  
(метод с коррекцией степени черноты материала)

Метод	1-й слой: ПММ	2-й слой: Рипор
$M[\Delta a^*_j]$	$1,71 \cdot 10^{-8}$	$6,19 \cdot 10^{-8}$
$\sigma[\Delta a^*_j]$	$1,25 \cdot 10^{-8}$	$5,42 \cdot 10^{-8}$
$M[\delta a^*_j]$	15,21 %	13,47 %
$\sigma[\delta a^*_j]$	11,14 %	11,79 %
$\Delta_{\text{пред}} a^*_j$	$9,12 \cdot 10^{-9}$	$5,13 \cdot 10^{-8}$
$\delta_{\text{пред}} a^*_j$	8,07 %	11,17 %
$M[\Delta \lambda^*_j]$	$6,44 \cdot 10^{-3}$	$1,00 \cdot 10^{-3}$
$\sigma[\Delta \lambda^*_j]$	$1,02 \cdot 10^{-2}$	$1,41 \cdot 10^{-3}$
$M[\delta \lambda^*_j]$	3,30 %	3,72 %
$\sigma[\delta \lambda^*_j]$	5,27 %	5,23 %
$\Delta_{\text{пред}} \lambda^*_j$	$1,50 \cdot 10^{-2}$	$1,94 \cdot 10^{-3}$
$\delta_{\text{пред}} \lambda^*_j$	7,71 %	7,93 %

Таблица 3.15

Данные обработки эксперимента  
(метод с коррекцией степени черноты материала)

Метод	1-й слой: керамзитобетон	2-й слой: пенопласт
$M[\Delta a^*_j]$	$3,20 \cdot 10^{-7}$	$8,11 \cdot 10^{-7}$
$\sigma[\Delta a^*_j]$	$1,35 \cdot 10^{-6}$	$4,94 \cdot 10^{-7}$
$M[\delta a^*_j]$	9,31 %	8,14 %

$\sigma[\delta a_j^*]$	2,29 %	2,47 %
$\Delta_{\text{пред}} a_j^*$	$3,20 \cdot 10^{-7}$	$2,22 \cdot 10^{-7}$
$\delta_{\text{пред}} a_j^*$	9,31 %	11,13 %
$M[\Delta \lambda_j^*]$	$1,63 \cdot 10^{-2}$	$1,36 \cdot 10^{-3}$
$\sigma[\Delta \lambda_j^*]$	$5,53 \cdot 10^{-3}$	$2,13 \cdot 10^{-3}$
$M[\delta \lambda_j^*]$	4,68 %	4,00 %
$\sigma[\delta \lambda_j^*]$	1,58 %	6,28 %
$\Delta_{\text{пред}} \lambda_j^*$	$2,79 \cdot 10^{-2}$	$3,10 \cdot 10^{-3}$
$\delta_{\text{пред}} \lambda_j^*$	7,99 %	9,13 %

Оценки относительных погрешностей измерения ТФС исследуемых образцов, представленные в табл. 3.10 – 3.15, показали, что разработанные бесконтактные методы НК имеют высокий метрологический уровень и могут быть применены в строительной теплотехнике для контроля ТФС многослойных строительных конструкций и изделий.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенный информационный анализ показал, что в настоящее время для обеспечения условий энергосбережения в строительстве широко используют дополнительную теплоизоляцию ограждающих конструкций зданий и сооружений. Наиболее эффективно эта проблема решается с использованием многослойных (двух- и трехслойных) конструкций, в которых одни слои обеспечивают прочность, а другие – тепловую защиту. При создании и эксплуатации таких многослойных конструкций необходимо иметь информацию о теплофизических свойствах (ТФС) как отдельных слоев, так и всей конструкции защитной оболочки в целом, так как ТФС в этом случае являются параметрами, определяющими теплозащитные свойства и качество строительных конструкций и изделий. Поэтому разработка и внедрение приборов и измерительных систем НК ТФС материалов многослойных строительных конструкций и изделий является актуальной задачей строительной теплотехники, решение которой позволяет осуществить экономию топливно-энергетических ресурсов.

Разработаны физико-математические модели температурных полей в исследуемых объектах при контактном и бесконтактном тепловом воздействии от линейного, дискового или точечного источника тепла, адекватно описывающие тепловые процессы в контролируемых изделиях. На основе полученных моделей разработаны новые, защищенные патентами на изобретения, эффективные в метрологическом отношении контактные и бесконтактные методы контроля ТФС многослойных строительных конструкций и изделий без нарушения их целостности и эксплуатационных характеристик, а именно:

1) контактный метод НК ТФС трехслойных строительных конструкций, состоящий в одновременном использовании начальной стадии нестационарного (импульсно-динамического) и квазистационарного тепловых режимов в исследуемом многослойном изделии;

2) метод бесконтактного НК ТФС двухслойных строительных конструкций с коррекцией влияния степени черноты исследуемых объектов и прозрачности промежуточной среды между исследуемыми объектами и приемно-излучательными блоками на результаты измерения;

3) бесконтактный адаптивный метод НК ТФС двухслойных строительных конструкций, имеющий высокую для технологического контроля точность и полную гарантию сохранения целостности и эксплуатационных характеристик исследуемых объектов в условиях ограниченной априорной информации об их свойствах, обусловленных адаптацией энергетических параметров теплофизического эксперимента и коррекцией результатов измерения на тепловые потери в окружающую среду, степень черноты поверхности исследуемых объектов и коэффициент прозрачности среды;

4) комбинированный оперативный метод НК ТФС трехслойных строительных конструкций, основанный на одновременном использовании контактного и бесконтактного тепловых воздействий на поверхность исследуемых объектов и обладающий высоким метрологическим уровнем, обусловленным использованием адаптивных измерительных процедур при определении энергетических параметров теплофизического эксперимента;

5) бесконтактный метод НК ТФС двухслойных строительных конструкций, использующий неподвижный измерительный зонд, обеспечивающий высокую для технологического контроля точность измерений, обусловленную уменьшением влияния на результаты эксперимента состояния поверхности исследуемого объекта и неучтенных тепловых потерь с нее. Кроме того, отсутствие погрешностей, присущих механически подвижным узлам в методах с подвижным измерительным зондом, значительно повышает метрологический уровень предложенного метода;

6) метод бесконтактного НК качества (толщины слоев, ТФС, пористости) многослойных металлических строительных конструкций, отличительной особенностью которого является бесконтактность измерения, оперативность и высокая производительность измерения

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

Проведен анализ погрешностей результатов измерений по разработанным контактному, бесконтактному и комбинированному методам на базе аналитических соотношений, полученных с использованием математических моделей объектов измерений, измерительных процедур и условий измерений. Для названных выше методов контроля ТФС получены структуры полной погрешности измерений, проведена оценка вклада каждой компоненты в соответствующую характеристику указанной погрешности и выделены доминанты в составе полной погрешности. Подобный подход создает предпосылки для целенаправленного воздействия на источники погрешности, а также коррекции результатов измерений.

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

Использование разработанных микропроцессорных приборов и систем в строительстве позволяет создавать оптимальную дополнительную теплоизоляцию ограждающих конструкций зданий и сооружений, чем обеспечиваются условия энер-

госбережения в градостроительном комплексе России. Результаты работы найдут широкое применение и в других важнейших и ответственных отраслях техники, таких, как ракетостроение, космическое аппаратостроение, атомная энергетика, теплотехника и т.д.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **СНиП II-3-79\***. Строительная теплотехника / Госстрой СССР. М.: Стройиздат, 1982. 40 с.
2. **О принятии** изменения № 3 СНиП II-3-79 «Строительная теплотехника»: Постановление Министерства строительства Российской Федерации № 18-81 от 11.08.1995.
3. **Пат. РФ № 2166188**. Бесконтактный адаптивный способ неразрушающего контроля теплофизических характеристик материалов / Э.В. Сысоев, В.Н. Чернышов, Т.И. Чернышова. Заявл. 5.01.2000; Оpubл. 27.04.2001. 18 с.
4. **Пат. РФ № 2168168**. Способ бесконтактного контроля теплофизических характеристик материалов / Э.В. Сысоев, В.Н. Чернышов, Т.И. Чернышова. Заявл. 4.08.1999; Оpubл. 27.05.2001. 16 с.
5. **Пат. РФ № 2208778**. Способ бесконтактного контроля теплофизических свойств материалов / А.В. Чернышов, Э.В. Сысоев, В.Н. Чернышов. Заявл. 12.01.2001; Оpubл. 20.07.2003. 8 с.
6. **Пат. РФ № 2211446**. Способ бесконтактного контроля теплофизических свойств материалов и устройство для его осуществления / А.В. Чернышов, Э.В. Сысоев. Заявл. 26.06.2001; Оpubл. 27.08.2003. 14 с.
7. **Пат. РФ № 2245538**. Способ неразрушающего контроля теплофизических свойств материалов многослойных конструкций / А.В. Чернышов. Заявл. 05.05.2003; Оpubл. 27.01.05. 10 с.
8. **Пат. № 2251098**. Способ бесконтактного неразрушающего контроля теплофизических свойств материалов / Э.В. Сысоев, В.Н. Чернышов, Р.В. Попов. Заявл. 17.11.2003; Оpubл. 27.04.2005. 11 с.
9. **Чернышов А.В., Чернышов В.Н.** Метод неразрушающего контроля теплофизических характеристик строительных материалов многослойных конструкций // Вестник Тамбовского государственного технического университета. 2002. Т. 8, № 1. С. 128 – 133.
10. **Чернышов А.В.** Метод неразрушающего контроля теплофизических свойств строительных материалов многослойных конструкций // Теплофизические измерения при контроле и управлении качеством: Материалы V Междунар. теплофиз. школы: В 2 ч. Тамбов, 20 – 24 сентября 2004 г. Тамбов, 2004. Ч. 1. С. 275 – 276.
11. **Чернышова Т.И., Чернышов В.Н.** Методы и средства неразрушающего контроля теплофизических свойств материалов. М.: Машиностроение, 2001. 240 с.
12. **Чернышов В.Н. и др.** Анализ и синтез измерительных систем. Тамбов: ТГТУ, 1995. 234 с.
13. **Дульнев Г.Н.** Тепло- и массообмен в радиоэлектронной аппаратуре. М.: Высшая школа, 1984. 247 с.
14. **Козлов В.П.** Двумерные осесимметричные нестационарные задачи теплопроводности / Под ред. А.Г. Шашкова. Минск: Наука и техника, 1986. 392 с.
15. **Чернышов А.В.** Метод неразрушающего контроля теплофизических характеристик многослойных изделий // Контроль. Диагностика. 2003. № 3. С. 40 – 44.
16. **Чернышов А.В.** Метод и процессорное средство неразрушающего контроля теплофизических характеристик многослойных изделий // Труды ТГТУ: Сб. науч. ст. молодых ученых и студентов. Тамбов, 2002. Вып. 11. С. 163 – 168.
17. **Чернышов А.В.** Бесконтактный метод неразрушающего контроля ТФХ материалов и изделий с анализом погрешностей на аналитической основе // Вестник метрологической академии. СПб.: Изд-во ВНИИМ им. Д.И. Менделеева, 2004. Вып. 12. С. 18 – 22.
18. **Рыкалин Н.Н.** Расчеты тепловых процессов при сварке. М.: Машгиз, 1951. 296 с.
19. **Якушенков Ю.Г.** Основы оптико-электронного приборостроения. М.: Сов. радио, 1977. 272 с.
20. **Хадсон Р.** Инфракрасные системы. М.: Мир, 1972. 536 с.
21. **Лыков А.В., Михайлов Ю.А.** Теория тепло- и массопереноса. М.: Госэнергоиздат, 1963. 535 с.
22. **Сысоев Э.В., Чернышова Т.И.** Моделирование тепловых процессов в исследуемых объектах при бесконтактном тепловом воздействии на них подвижным точечным источником тепла // Вестник Тамбовского государственного технического университета. 2002. Т. 8, № 1. С. 70 – 78.
23. **Сысоев Э.В., Чернышов В.Н.** Модель тепловых процессов при бесконтактном воздействии подвижным точечным источником тепла на исследуемые объекты с учетом тепловых потерь // Теплофизические измерения в начале XXI века: Тез. докл. IV междунар. теплофиз. школы (24 – 28 сентября 2001 г.). Тамбов: Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2001. Ч. 2. С. 87 – 88.
24. **Лазерная техника и технология.** В 7 кн. Кн. 3: Методы поверхностной лазерной обработки: Учеб. пособие для вузов / А.Г. Григорьянц, А.Н. Сафонов; Под ред. А.Г. Григорьянца. М.: Высшая школа, 1987. 191 с.
25. **Вавилов В.П.** Тепловые методы контроля композиционных структур и изделий радиоэлектроники. М.: Радио и связь, 1984. 152 с.
26. **Сысоев Э.В., Чернышов А.В.** Метод бесконтактного неразрушающего контроля теплофизических свойств с коррекцией влияния степени черноты исследуемых материалов // Труды ТГТУ: Сб. науч. ст. молодых ученых и студентов. Тамбов, 2001. Вып. 9. С. 110 – 116.
27. **Чернышов А.В.** Метод и микропроцессорное устройство бесконтактного неразрушающего контроля теплофизических свойств многослойных изделий // Проектирование и технология электронных средств. 2004. № 3. С. 29 – 33.
28. **Чернышов А.В.** Метод и информационно-измерительная система бесконтактного неразрушающего контроля теплофизических свойств материалов // Математические методы в технике и технологиях: Сб. тр. XV Междунар. науч. конф. Тамбов, 2002. Т. 7. С. 37 – 40.
29. **Сысоев Э.В., Чернышов В.Н.** Бесконтактный адаптивный метод неразрушающего контроля теплофизических свойств материалов // Контроль. Диагностика. 2000. № 2 (20). С. 31 – 34.

30. **Чернышов А.В.** Бесконтактный метод неразрушающего контроля ТФС материалов и изделий с анализом погрешностей на аналитической основе // IV Всерос. с междунар. участием науч.-практ. семинар: Сб. тез. докл. СПб., 2003. С. 53 – 54.
31. **Чернышов А.В.** Бесконтактный метод неразрушающего контроля теплофизических свойств материалов и готовых изделий // Энергосбережение и энергоэффективные технологии-2004: Сб. докл. Всерос. науч.-техн. конф. Липецк, 2004. Ч. II. С. 39 – 40.
32. **Чернышов А.В.** Метод неразрушающего контроля ТФС многослойных изделий при одновременном контактном и бесконтактном тепловых воздействиях на исследуемые объекты // Вестник метрологической академии. СПб.: Изд-во НИИМ им. Д.И. Менделеева, 2005. Вып. 15. С. 32 – 37.
33. **Чернышов А.В., Иванов Г.Н.** Метод неразрушающего контроля теплофизических свойств многослойных теплозащитных покрытий и изделий // Контроль. Диагностика. 2007. № 6 (108). С. 50 – 54.
34. **Чернышов А.В.** Неразрушающий контроль теплофизических свойств трехслойных изделий с бесконтактным определением теплофизических характеристик наружных слоев // Труды ТГТУ: Сб. науч. ст. молодых ученых и студентов. Тамбов, 2005. Вып. 19. С. 52 – 55.
35. **Чернышов А.В., Иванов Г.Н.** Адаптивный метод неразрушающего контроля теплофизических свойств многослойных конструкций и изделий // Фундаментальные и прикладные исследования, инновационные технологии, профессиональное образование: Сб. трудов XII науч. конф. ТГТУ. Тамбов, 2007. С. 64 – 68.
36. **Чернышов А.В., Иванов Г.Н.** Информационно-измерительная система и метод неразрушающего контроля теплофизических свойств многослойных теплозащитных покрытий и изделий // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2007. № 1. С. 23 – 26.
37. **Сысоев Э.В., Чернышов В.Н., Попов Р.В.** Метод бесконтактного неразрушающего контроля теплофизических свойств твердых материалов // Вестник Тамбовского государственного технического университета. 2005. Т. 11, № 3. С. 641 – 648.
38. **Карслоу Г., Егер Д.** Теплопроводность твердых тел. М.: Наука, 1964. 487 с.
39. **Анго А.** Математика для электро- и радиоинженеров. М.: Наука, 1964. 772 с.
40. **Сысоев Э.В., Чернышов В.Н., Попов Р.В.** Моделирование тепловых процессов в объектах бесконтактного неразрушающего контроля их теплофизических свойств // Математические методы в технике и технологиях: Сб. тр. XV Междунар. науч. конф. Т. 7. Секция 7. Тамбов, 2002. С. 40 – 42.
41. **Сысоев Э.В., Чернышов В.Н., Попов Р.В.** Модель тепловых процессов при бесконтактном воздействии точечным источником тепла на исследуемые объекты // Энергосбережение и энергоэффективные технологии-2004: Сб. докл. Всерос. науч.-техн. конф. Ч. I. Липецк: Изд-во Лип. гос. техн. ун-та, 2004. С. 127 – 128.
42. **Сысоев Э.В., Чернышов В.Н., Попов Р.В.** Метод бесконтактного неразрушающего контроля теплофизических свойств материалов и устройство для его осуществления // Контроль. Диагностика. 2004. № 12 (78). С. 37 – 42.
43. **Сысоев Э.В., Попов Р.В.** Метод бесконтактного неразрушающего контроля теплофизических свойств материалов // Теплофизические измерения при контроле и управлении качеством: Материалы V Междунар. теплофиз. школы: В 2 ч. Тамбов: Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2004. Ч. 1. С. 268 – 270.
44. **Сысоев Э.В., Чернышов В.Н., Попов Р.В.** Метод бесконтактного неразрушающего контроля теплофизических свойств твердых материалов // Неразрушающий контроль и техническая диагностика в промышленности: 3-я Междунар. выставка и конф. 17 – 18 марта 2004 г. М.: ЦМТ, 2004. С. 37.
45. **Чернышов В.Н., Пудовкин А.П.** Метод неразрушающего контроля качества металлофторопластовых материалов // Вестник ТГТУ. 2004. Т. 10, № 3. С. 675 – 681.
46. **Чернышов В.Н., Пудовкин А.П., Челноков А.В.** Контроль качества металлофторопластовых материалов // Наука на рубеже тысячелетий: Сб. науч. ст. по материалам конф. 29 – 30 октября 2004 г. Тамбов: ПРОЮЛ Бирюкова М.А., 2004. С. 264 – 267.
47. **Семенов А.П., Савинский Ю.Э.** Металлофторопластовые подшипники. М.: Машиностроение, 1976. 192 с.
48. **Чернышов В.Н., Пудовкин А.П., Плужников Ю.В., Колмаков А.В.** Метод бесконтактного неразрушающего контроля слоев двухслойных изделий и анализ теплофизических процессов в биметаллах // Вестник ТГТУ. 2002. Т. 8, № 2. С. 190 – 200.
49. Пористые проницаемые материалы: Справ. изд. / Под ред. С.М. Белова. М.: Металлургия, 1987. 335 с.
50. **Дульнев Г.Н., Заричняк Ю.П.** Теплопроводность смесей и композиционных материалов. Л.: Энергия, 1974. 264 с.
51. **Цветков Э.И.** Алгоритмические основы измерений. СПб.: Энергоатомиздат, 1992. 254 с.
52. **Чернышов А.В.** Оценка погрешностей результатов измерения ТФС многослойных изделий на основе аналитических методов // VIII науч. конф. ТГТУ: Сб. тез. докл. Тамбов, 2003. Ч. 1. С. 253 – 254.
53. **Чернышов А.В.** Метрологический анализ метода неразрушающего контроля теплофизических свойств многослойных строительных изделий // Неразрушающий контроль и техническая диагностика в промышленности: 3-я Междунар. выставка и конф. 17 – 18 марта 2004 г. М., 2004. С. 242.
54. **Чернышов А.В.** Метрологическое обеспечение разработанных методов и средств бесконтактного неразрушающего контроля теплофизических свойств // Метрология, стандартизация, сертификация и управление качеством продукции: Материалы шк.-семинара молодых ученых. Тамбов, 2003. С. 145 – 146.
55. **Чернышов А.В.** Метрологический анализ бесконтактных методов неразрушающего контроля теплофизических свойств материалов на основе математического описания измерительных процедур и цепей // Труды ТГТУ: Сб. науч. ст. молодых ученых и студентов. Тамбов, 2003. Вып. 13. С. 204 – 207.
56. **Чернышов А.В.** Анализ погрешностей бесконтактного метода неразрушающего контроля ТФХ материалов // Труды ТГТУ: Сб. науч. ст. молодых ученых и студентов. Тамбов, 2004. Вып. 16. С. 63 – 67.

57. **Сысоев Э.В., Попов Р.В.** Метрологическое обеспечение метода бесконтактного неразрушающего контроля теплофизических свойств твердых материалов // Труды ТГТУ: Сб. науч. ст. молодых ученых и студентов. Тамбов, 2004. Вып. 15. С. 241 – 244.
58. **Поскачей А.А., Чубарев Е.П.** Оптико-электронные системы измерения температуры. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Энергоатомиздат, 1988. 248 с.
59. **Сергеев О.А.** Метрологические основы теплофизических измерений. М.: Изд-во стандартов, 1972. 154 с.
60. **Мень А.А., Сергеев О.А.** Лучисто-кондуктивный теплообмен в плоском слое // Исследования в области тепловых измерений. М.: Изд-во стандартов, 1969. 186 с.
61. **Рабинович С. Г.** Погрешности измерений. Л.: Энергия, 1978. 261 с.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	3
1. АКТУАЛЬНОСТЬ СОЗДАНИЯ ДОПОЛНИТЕЛЬНОЙ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИИ ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ .....	6
2. МЕТОДЫ И СИСТЕМЫ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ ТЕПЛОЗАЩИТНЫХ СВОЙСТВ МНОГОСЛОЙНЫХ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ И ИЗДЕЛИЙ .....	9
2.1. Контактный метод и система НК ТФС трехслойных строительных конструкций .....	9
2.2. Бесконтактный метод и система НК ТФС двухслойных строительных конструкций с коррекцией влияния степени черноты исследуемых объектов на результаты измерений ...	21
2.3. Адаптивный по энергетическим параметрам бесконтактный метод и система НК ТФС двухслойных строительных конструкций .....	34
2.4. Метод и система НК ТФС трехслойных строительных конструкций с использованием комбинации контактного и бесконтактного тепловых воздействий на исследуемый объект	42
2.5. Метод и система бесконтактного НК ТФС двухслойных строительных конструкций с неподвижным измерительным зондом .....	53
2.6. Метод и система бесконтактного НК качества многослойных металлических строительных конструкций.....	62
3. МЕТРОЛОГИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ МЕТОДОВ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ ТЕПЛОЗАЩИТНЫХ СВОЙСТВ МНОГОСЛОЙНЫХ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ И ИЗДЕЛИЙ .....	69
3.1. Анализ погрешности контактного метода НК ТФС трехслойных строительных конструкций .....	70
3.2. Анализ погрешности бесконтактного метода НК ТФС двухслойных строительных конструкций с коррекцией влияния степени черноты исследуемых объектов на результаты измерений .....	78
3.3. Анализ погрешности адаптивного по энергетическим параметрам бесконтактного метода НК ТФС двухслойных строительных конструкций .....	80
3.4. Анализ погрешности метода НК ТФС трехслойных строительных конструкций с использованием комбинации контактного и бесконтактного тепловых воздействий на исследуемый объект .....	83
3.5. Анализ погрешности метода бесконтактного НК ТФС двухслойных строительных конструкций с неподвижным измерительным зондом .....	86
3.6. Анализ погрешности метода бесконтактного НК качества	89



многослойных металлических строительных конструкций...

3.7. Экспериментальные исследования методов и систем НК  
ТФС многослойных строительных конструкций и изделий 92

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ..... 102

СПИСОК ..... ЛИТЕРАТУРЫ 105