

Интеллектуальная информационно-измерительная система для определения теплофизических свойств материалов и изделий

З. М. СЕЛИВАНОВА, А. А. САМОХВАЛОВ

Тамбовский государственный технический университет, Тамбов, Россия,
e-mail: Selivanova @mail.jesby.tstu.ru

Предложен новый образец интеллектуальной информационно-измерительной системы для определения теплофизических свойств материалов и изделий из них, отличающийся от существующих оперативным и точным измерением определяемых параметров в результате оригинальной схемотехнической реализации алгоритма функционирования системы на основе созданных способа измерения, интеллектуального измерительного зонда, базы знаний для рассматриваемой предметной области и программного обеспечения.

Ключевые слова: интеллектуальная система, теплофизические свойства материалов, база знаний, измерительный зонд.

The new model of intellectual measuring information system for determining thermophysical properties of materials and products determination is proposed. The difference from existing systems includes the accurate measurement of parameters under determination by means of the original circuit realization of system algorithm based on the created measurement method, intellectual measuring probe, a knowledge base for the subject under consideration field and a software.

Key words: intellectual system, thermophysical properties of materials, knowledge base, measuring probe.

В настоящее время на предприятиях, осуществляющих производство материалов и изделий, и в научно-исследовательских лабораториях при разработке материалов с заданными теплофизическими свойствами (ТФС) крайне востребованы информационно-измерительные системы для определения ТФС материалов и изделий, поскольку в условиях конкуренции предприятия и лаборатории заинтересованы в разработке и выпуске качественной продукции, обеспечивающей теплозащитные свойства, и решении задач энергосбережения при использовании теплоизоляционных материалов в строительной промышленности.

Для решения задач изготовления материалов с заданными параметрами ТФС исследуемых объектов, расширения диапазона определения указанных параметров предлагается интеллектуальная информационно-измерительная система (ИИИС). При ее проектировании и эксплуатации большое внимание уделяется повышению точности и оперативности измерения параметров ТФС материалов — теплопроводности λ и температуропроводности a .

Информационно-измерительные системы (ИИС) и ИИИС, описанные в [1—3], не в полной мере отвечают необходимым характеристикам: оперативности, широкому диапазону исследуемых материалов, возможности контролировать комплекс определяемых параметров, метрологическому уровню результатов измерений, устойчивости к воздействию дестабилизирующих факторов, функционированию в условиях неопределенности, возможности перестройки структуры системы и выбора метода контроля при измерении параметров качественных свойств материалов и технологического процесса изготовления материалов и изделий.

В предлагаемой ИИИС для определения параметров ТФС, в отличие от существующих, новым является использование

интеллектуального измерительного зонда (ИИЗ) с полупроводниковыми датчиками в составе измерительной кассеты, входящей в ИИЗ, микроконтроллером в измерительной цепи, реализующим алгоритм работы зонда, в результате применения которых расширяется диапазон определения этих параметров, а также использование быстродействующего коммутационного устройства, позволяющего подключить к нагревателю кассеты соответствующее напряжение с блока питания при формировании теплового воздействия на объект в зависимости от его теплопроводности. Создана база знаний ИИИС, содержащая информацию пользователей — специалистов в рассматриваемой предметной области, при помощи которой осуществляются функционирование системы с реализацией методов искусственного интеллекта и принятие решений в условиях неопределенности при нахождении объекта, т. е. при отсутствии информации о классе исследуемых материалов и изделий по теплопроводности, условиях измерений, воздействующих дестабилизирующих факторах.

Математический аппарат методов искусственного интеллекта применяется при выборе способа контроля для определенной измерительной ситуации, оптимизации режимов измерений, классификации объектов и распознавания образов, использования созданной базы знаний и изменения конфигурации ИИИС в зависимости от класса исследуемого материала или изделия по основному определяющему его признаку — теплопроводности.

Ниже приведены структура разработанной ИИИС, способ неразрушающего контроля (НК) ТФС материалов, а также алгоритм работы и схемотехническая реализация системы. Предлагаемая ИИИС предназначена для оперативного НК твердых материалов (строительных, полимерных, композитных наноматериалов, теплоизоляционных и др.) и из-

делий из них. К ее преимуществам по отношению к системам аналогичного назначения относятся: контроль комплекса определяемых параметров ТФС, оперативность, высокий метрологический уровень результатов измерений, устойчивость к воздействию дестабилизирующих факторов.

Технические характеристики ИИИС

Диапазоны определяемых параметров:

теплопроводность 0,02—1 Вт/(м · К)

температуропроводность $(1,0—10,0) \cdot 10^{-7}$ м²/с

Характеристика исследуемых материалов и изделий:

размер, не менее 60×60×5 мм

шероховатость поверхности 0,1—0,2 мм

Диапазон температур 10—50 °С

Габаритные размеры 280×180×100 мм

Масса 2,5 кг

Потребляемая мощность 50 Вт

Напряжение и частота питания 220 В, 50 Гц

Индикация LCD 4×20

Время определения параметров, не более 3 мин

Погрешность измерения, не более 3—5 %

В ИИИС реализуется следующий способ НК ТФС материалов [4]. После проведения очередного измерения с использованием метода НК, основанного на тепловом воздействии на поверхность объекта линейным нагревателем импульсами с заданными частотой и мощностью, измерительный термозонд помещают на вспомогательный образец из материала, близкого по ТФС к материалу подложки термозонда (рис. 1). При этом температура $T(x, z, \tau)$ в подложке термозонда при двумерном потоке тепла, вызванного действием его мгновенного линейного источника, определяется по соотношению [5]:

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

где Q — мощность теплового воздействия; (x, z) — координаты точки контроля температуры, τ — время.

При частотно-импульсном воздействии на исследуемый материал температуру в точках контроля x, z при подаче n -го импульса рассчитывают по формуле

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

где F — частота тепловых импульсов; Δt — интервал времени между ними; i — количество импульсов, $i = 1, \dots, n$.

На рис. 1 представлена физическая модель системы термозонд — вспомогательный образец. Здесь x_1, x_2 — точки контроля температуры в плоскости XOY , причем точка x_2 расположена на заданном расстоянии от нагревателя 7, при котором отсутствует прямое влияние нагревателя под воздействием лучистого и конвективного теплообменов, а точка x_1 — на расстоянии от края подложки, обеспечивающем отсутствие влияния краевого эффекта на результаты измерения из-за ограниченности размеров подложки зонда; z_1, z_2 — точки контроля температуры в плоскости ZOY , точка z_1 расположена аналогично точке x_2 , а z_2 — на некоторой глубине, устраняющей действие краевого эффекта из-за ограниченности подложки. В ходе работы контролируют перепад температур в плоскости XOY ($z = 0$) в точках x_2, x_1 :

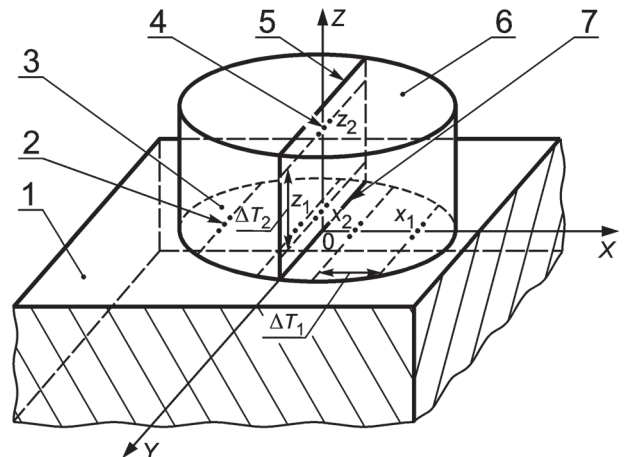


Рис. 1. Физическая модель системы термозонд — вспомогательный образец:

1 — вспомогательный образец (тело 2); 2 — основная термобатарея в плоскости XOY ; 3 — контактная плоскость XOY измерительной головки термозонда; 4 — вспомогательная термобатарея в плоскости ZOY термозонда; 5 — плоскость ZOY , проходящая через линию нагревателя и перпендикулярная плоскости XOY ; 6 — подложка термозонда (тело 1); 7 — нагреватель

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

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

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

При этом определяется момент времени, когда контролируемые перепады температур $\Delta T_1, \Delta T_2$ внутри подложки станут меньше заранее заданного значения ε : $\max\{\Delta T_1, \Delta T_2\} < \varepsilon$. На практике ε задается обычно не выше 0,2 — 0,3 °С, что означает наступление момента уравнивания (усреднения) температуры по всему объему подложки.

Как только перепады температур по объему подложки термозонда станут меньше заданного значения ε , что соответствует усреднению температуры по объему подложки термозонда, ИИЗ приводят в контакт со следующим исследуемым материалом для проведения очередного измерения и определения искомых ТФС в соответствии с реализуемым в системе частотно-импульсным методом. Коэффициенты температуро- и теплопроводности рассчитываются по соотношениям

$$a = K_1 \exp(K_2 T_p / T_m); \lambda = (1/T_m) K_3 \ln(K_4 a); \quad (1)$$

$$T_p = T(x, p); T_m = T(x, m),$$

где K_1, K_2, K_3, K_4 — константы, определяемые при градуировке ИИИС; p, m — точки контроля температуры.

При этом в системе термозонд — исследуемый материал происходят два тепловых процесса. Первый соответствует граничным условиям четвертого рода, т. е. теплообмену при контакте двух тел, температура одного из которых (подложки термозонда) выше другого. На границе контакта этих тел температура устанавливается после их контакта и остается постоянной на протяжении всего процесса теплообмена, так как относительная температура будет одинаковой [5]:

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

где K_3 — критерий, характеризующий тепловую активность

первого тела по отношению ко второму, $K_3 = (\lambda_1/\lambda_2) \sqrt{a_2/a_1}$, где $\lambda_1, a_1, \lambda_2, a_2$ — коэффициенты тепло- и температуропроводности подложки и исследуемого материала, соответственно; τ — время; x — координата точки контроля температуры.

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

$$T(x, \tau) = T_{\text{ост}}(x, \tau) + T_{\text{имп}}(x, \tau),$$

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

Основным недостатком известных методов, применяющихся для НК ТФС материалов, является то, что неотъемлемым, с точки зрения метрологии, условием его работы является необходимость охлаждения измерительной головки после каждого измерения до температуры окружающей среды, чтобы достичь равенства температур головки и объекта. Но поскольку охлаждение подложки измерительной головки осуществляется, в основном, только через одну контактную поверхность, а боковые поверхности подложки находятся внутри корпуса ИИЗ практически при адиабатических условиях, этот процесс очень длительный и составляет в среднем не менее 10 — 30 мин. В предлагаемом методе необходимое условие начала следующего измерения — момент наступления температурного уравнивания (усреднения) в объеме подложки, которое наступает для большинства применяемых теплоизоляционных материалов за 2 — 3 мин. Таким образом, оперативность измерений при использовании предлагаемого метода увеличивается не менее чем в 5 — 10 раз.

Далее регистрируют предварительную тестовую термограмму, по которой оценивают λ объекта или разность среднеинтегральных температур после подачи $(i-1)$ -го или i -го импульсов снимаемой термограммы, при этом фиксируют время $\tau_{\text{уст}}$ достижения установившегося теплового режима в контактной области ИИЗ и объекта, определяют оптимальное количество n тепловых импульсов, подаваемых на объект до наступления установившегося теплового режима, и оптимальный промежуток $\tau_{\text{уср}}$ времени усреднения температуры по объему подложки ИИЗ. С учетом полученных параметров $\tau_{\text{уст}}$, n , $\tau_{\text{уср}}$ определяют ТФС материалов с прогнозируемой погрешностью не более 5 %. Многолетний опыт авторов при проектировании теплофизических приборов и ИИС позволяет прогнозировать погрешность измерения λ и a на основе анализа воздействующих дестабилизирующих факторов на ИИИС и применения методики [6] коррекции результатов измерений с учетом погрешностей методов нахождения λ, a .

Структурная схема ИИИС представлена на рис. 2 и включает ИИЗ и информационно-вычислительное устройство ИВУ. В состав ИИЗ входят измерительная кассета ИК с полупроводниковыми датчиками температуры ДТ1, ..., ДТ4 и нагревателем Н, блок формирования тепловых импульсов БФТИ, содержащий быстродействующее коммутационное устройство БКУ, микроконтроллер МК1 со встроенным АЦП, преобразователь интерфейса ПИ1. В составе ИВУ — микроконтроллер МК2, клавиатура Кл, база знаний БЗ, жидкокристаллический индикатор ЖКИ, преобразователь интерфейса ПИ2, блок принятия решений БПР и блок питания БП, формирующий питающие напряжения для всех компонентов системы. В данной системе реализован физический интерфейс обмена данными RS-232 на ПИ1, ПИ2, что позволяет использовать ИИЗ как в составе с ИВУ, так и для подключения к персональному компьютеру с соответствующей управляющей программой.

Интеллектуальный измерительный зонд выполнен на основе МК1 типа PIC18LF2523, отличительной особеннос-

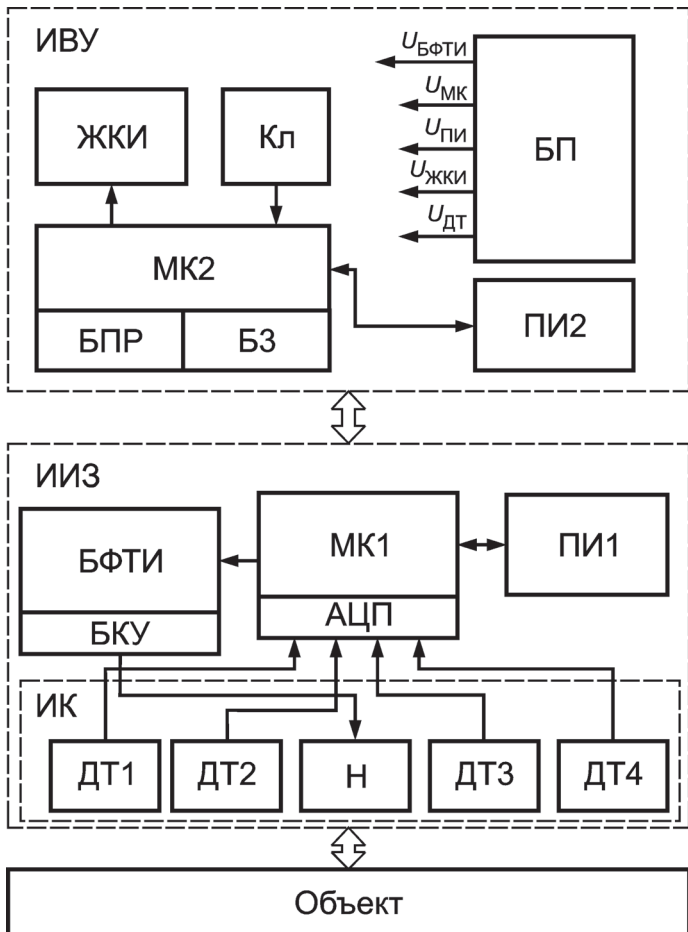


Рис. 2. Структурная схема интеллектуальной информационно-измерительной системы теплофизических свойств материалов и изделий

тью которого является наличие быстродействующего (до 500000 выборок в секунду) двенадцатиразрядного АЦП. Использование полупроводниковых датчиков ДТ1, ..., ДТ4 типа LM62 (15,6 мВ/°С) позволяет отказаться от дополнительного применения усилителей постоянного тока для нормирования требуемого уровня сигнала с каждого датчика для последующего преобразования в микроконтроллере.

Разработанный блок формирования тепловых импульсов базируется на мощном полевом транзисторе типа IRF3205 с сопротивлением открытого канала 8 мОм, включенным по схеме истокового повторителя. Управляющее напряжение формируется цифроаналоговым преобразователем (ЦАП) типа MCP4921E и задается микроконтроллером по SPI-шине. Длительности импульсов нагрева и интервалов между ними задаются микроконтроллером МК1 с помощью таймера. Мощность теплового воздействия нагревателем на объект зависит от сопротивления нагревателя и подаваемого на него напряжения с БФТИ и формируется в соответствии с классом объекта. Таким образом, можно получать информативные сигналы ИИЗ во время измерений объектов с различной теплопроводностью и, следовательно, расширять диапазон исследуемых объектов по их теплопроводности. Максимальная мощность теплового воздействия определяется устойчивостью объекта к тепловому воздействию измерительной кассеты зонда.

Информационно-вычислительное устройство основано на МК2 типа PIC18F8720, который характеризуется высоким быстродействием и большим объемом памяти, многоканальным портом параллельного ввода-вывода информации. Для отображения информации используется четырехстрочный знакосинтезирующий ЖКИ типа MT-20S4D (фирма «МЭЛТ», Россия). Для ввода параметров измерения и управления работой ИИИС служит матричная клавиатура Кл 4×4, выполненная на тактовых микрокнопках.

Параметры ТФС определяют с помощью ИИЗ, функцией которого является нахождение среднеинтегрального значения температуры в плоскости контакта зонда и объекта с применением термодатчиков, расположенных на поверхности подложки измерительной кассеты. При измерении используют нестационарный метод НК ТФС материалов, который заключается в тепловом воздействии нагревателя на поверхность объекта импульсами с заданными частотой и мощностью с последующей регистрацией термограммы; на ее основе в ИВУ рассчитываются параметры ТФС. Тепловые импульсы БФТИ с заданными частотой, мощностью и интервалом следования поступают на измерительную кассету ИИЗ, помещенного на объект. Информация о температурном поле в плоскости контакта зонда и объекта поступает от термодатчиков в МК1 в аналоговом виде. Этот микроконтроллер со встроенным АЦП преобразует аналоговые сигналы и формирует информационные сигналы, которые передаются через ПИ1 в ИВУ. Все вычислительные операции, а также управление ИИИС осуществляет МК2. В его память записывают программу, реализующую алгоритм функционирования ИИИС для определения ТФС материала-

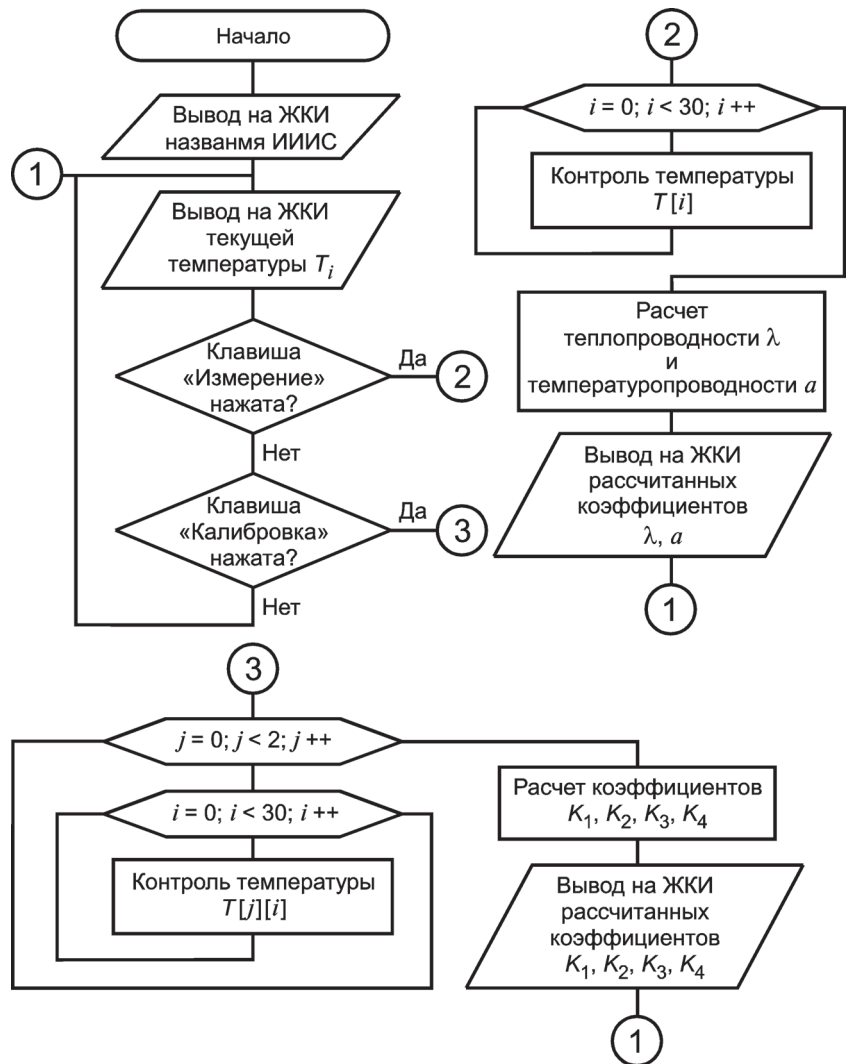


Рис. 3. Алгоритм функционирования интеллектуальной информационно-измерительной системы для определения теплофизических свойств материалов

лов. В МК2 в соответствии с заданными в программе алгоритмом функционирования и расчетными зависимостями (1) определяются λ и α материалов.

Для ИИИС разработано программное обеспечение (ПО), реализующее алгоритм ее работы, который представлен на рис. 3 (для микроконтроллера типа PIC18F8720). При включении питания настраиваются периферийные модули. После этого запрашиваются данные о температурном поле в области контакта ИИЗ (см. рис. 2) и объекта. Текущая температура выводится на экран ЖКИ. Пользователь при нажатии клавиши клавиатуры может выбрать следующие функции: измерение, калибровка ИИИС или просмотр термограммы предыдущего измерения. При выборе измерения или калибровки МК2 в составе ИВУ формирует и отправляет команду в МК1 в составе ИИЗ через ПИ1, ПИ2. Затем МК1 включает АЦП, два таймера и импульсный нагрев БФТИ с заданными длительностью и скважностью и передает в МК2 информацию о значениях температуры в плоскости контакта. Значения температуры в цифровом виде записываются в массив данных МК2. В процессе измерения информация о текущей температуре T_i выводится на экран ЖКИ.

Эталонные и измеренные значения λ и a материалов

Материал объекта	Эталонные значения		Измеренные значения		Относительная погрешность измерения	
	$a \cdot 10^{-7}$, м ² /с	λ , Вт/(м · К)	$a \cdot 10^{-7}$, м ² /с	λ , Вт/(м · К)	δ_a , %	δ_λ , %
Полимер-модифицированный материал	1,09	0,195	1,10	0,198	1,00	1,54
Рипор	4,61	0,028	4,66	0,0283	1,08	1,07
Бетон	1,58	0,54	1,64	0,56	3,79	3,70
Цемент, затвердевший (в результате коллоидации)	0,86	0,84	0,89	0,87	3,49	3,57

После окончания измерения по полученным значениям T_i определяются ТФС-параметры объекта (λ , a) в ИВУ и результаты выводятся на экран ЖКИ. Данные экспериментальных исследований приведены в таблице и позволяют сделать вывод, что точность определения λ , a соответствует допустимым значениям для данного класса СИ с учетом погрешности метода определения ТФС материалов и изделий. Из анализа экспериментальных результатов также следует, что бетон и цемент измерены с большей погрешностью, так как при измерениях ТФС для них формируется сигнал менее информативный по сравнению с сигналами от теплоизоляционных материалов из-за большей теплопроводности бетона и цемента и шероховатости их поверхностей, влияющей на контактное сопротивление в плоскости контакта зонда и объекта.

Если относительная погрешность измерения ТФС превышает 5 %, то проводится калибровка ИИИС. Калибровка заключается в выполнении измерений на эталонных образцах, расчете и коррекции калибровочных коэффициентов K_1 , K_2 , K_3 , K_4 из (1). В качестве эталона при проведении теплофизических измерений использовали меру теплопроводности из органического стекла [7] диаметром 100 мм и высотой 10,01 мм (Свидетельство о поверке № 921 — 014807, выдано ВНИИМ им. Д. И. Менделеева).

Таким образом, разработана новая ИИИС для определения ТФС материалов на основе проектирования интеллектуальных измерительных систем [3], метода НК с элементами искусственного интеллекта [4], осуществлена схемотехническая реализация алгоритма функционирования ИИИС с применением новых компонентов для оперативной и точной передачи и обработки информации: интеллектуального измерительного зонда с полупроводниковыми датчиками температуры нового поколения, быстродействующего коммутационного устройства блока формирования тепловых импульсов, созданных базы знаний и программного обеспечения ИИИС на языке программирования С при использовании компилятора CCS PCWH.

Усовершенствование ИИИС позволило достичь поставленных целей повышения оперативности и точности метода НК ТФС материалов и изделий из них, расширения диапазона исследуемых объектов по их теплопроводности, что подтверждено проведенными экспериментальными исследованиями разработанной системы.

Л и т е р а т у р а

1. **Виноградова Н. А. и др.** Основы построения информационно-измерительных систем: Пособие по системной интеграции / Под. ред. В. Г. Свиридова. М.: Изд-во МЭИ, 2004.
2. **Раннев Г. Г. и др.** Информационно-измерительная техника и электроника / Под ред. Г. Г. Раннева. М.: Издат. центр «Академия», 2006.
3. **Селиванова З. М.** Проектирование интеллектуальных информационно-измерительных систем контроля теплофизических свойств материалов // Вестник Тамбовского гос. техн. ун-та. 2010. Т. 16. № 2. С. 273—283.
4. **Пат. 2301996 РФ.** Способ неразрушающего контроля теплофизических свойств материалов и изделий / Ю. Л. Муромцев, З. М. Селиванова // Изобретения. Полезные модели. 2007. № 18.
5. **Лыков А. В.** Теория тепло- и массопереноса. М.: Госэнергоиздат, 1963.
6. **Селиванова З. М.** Информационно-измерительная система контроля качественных свойств материалов с учетом дестабилизирующих факторов / Информационные системы и процессы: Сборник науч. трудов. 2008. Вып. 7. С. 43—46.
7. **ГОСТ 17622—72.** Стекло органическое техническое. Технические условия.

Дата принятия 20.04.2012 г.