

ИДЕНТИФИКАЦИЯ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИТУАЦИИ ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ТВЕРДЫХ МАТЕРИАЛОВ В УСЛОВИЯХ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ

З. М. Селиванова, К. В. Скоморохов

*Кафедра «Конструирование радиоэлектронных и микропроцессорных систем»,
selivanova_zm@mail.ru; ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия*

Ключевые слова: идентификация; измерительная ситуация; интеллектуальная измерительная система; неопределенность измерений; теплофизические свойства.

Аннотация: Рассмотрены основные факторы, характеризующие неопределенность измерительной ситуации при проведении теплофизических измерений. Предложен подход для определения параметров теплофизических свойств материалов и погрешности измерений в условиях неопределенности. Создана концептуальная модель формирования измерительной среды интеллектуальной информационно-измерительной системы теплофизических свойств материалов в ситуации неопределенности. Представлено решение оптимизационной задачи идентификации измерительной ситуации при определении теплофизических свойств твердых материалов различного диапазона теплопроводности. Разработана информационная модель, применяемая для идентификации измерительной ситуации в интеллектуальной информационно-измерительной системе, функционирующей в условиях неопределенности.

Введение

При решении производственных задач в энергетике, строительстве, машиностроении и других отраслях промышленности широкое применение находят теплоизоляционные, композитные, полимерные материалы, которые характеризуются важными теплофизическими свойствами (**ТФС**) – теплопроводностью λ , температуропроводностью α и теплоемкостью c .

Применение методов искусственного интеллекта и их использование в интеллектуальных информационно-измерительных системах рассмотрено в научных трудах зарубежными учеными, основоположниками интеллектуальных измерений [1, 2]. В статье [3] приводится описание информационно-измерительной системы. Интеллектуальные измерительные системы весьма точно определяют теплофизические свойства материалов, но недостаточно оперативно. Российские ученые представили в ряде работ интеллектуальные средства измерений [4]. Анализ рассмотренных интеллектуальных информационно-измерительных систем (**ИИИС**) позволил сделать вывод о невысоком быстродействии и значительной погрешности измерения определяемых параметров в результате воздействия влияющих факторов. Известные тепловые методы неразрушающего контроля ТФС теплоизоляционных материалов также характеризуются невысокой оперативностью и точностью [5, 6].

Неопределенность измерений теплопроводности твердых материалов исследована в работе [7], однако не приведены направления повышения точности теплофизических измерений.

Цель исследования – повышение точности определения ТФС материалов с различными диапазонами теплопроводности на основе использования результатов оценки неопределенности измерений, что является важной и актуальной задачей при повышении качества изготавливаемых материалов и изделий.

Неопределенность определения теплофизических свойств материалов

Понятие неопределенности измерений и ее оценку устанавливает Межгосударственный стандарт ГОСТ ISO/IEC 17025–2019 [8].

При неразрушающем контроле ТФС материалов неопределенность измерений определяется следующими факторами: несовершенством метода измерения ТФС, недостаточной точностью измерительных средств, воздействием влияющих факторов, неизвестной теплопроводностью и видом исследуемых материалов, влиянием длительности формируемых тепловых импульсов.

Для определения ТФС объектов исследования применяется импульсный метод линейного источника тепла. В основу метода положено решение двумерного уравнения теплопроводности для неограниченных тел в результате воздействия тепловыми импульсами на объект в течение заданного времени. Температуру при подаче n -го импульса определяют по формуле [9, 10]

$$T(x, n) = \frac{QF}{4\pi\lambda} \sum_{i=1}^{n-1} \frac{1}{i} \exp\left(-\frac{x^2}{4\alpha\Delta t i}\right), \quad (1)$$

где Q – мощность источника тепла; F – значение частоты импульсов; x – расстояние между линейным источником тепла и точкой контроля; λ , α – коэффициенты теплопроводности и температуропроводности соответственно; τ – время.

На основе формулы (1) с использованием измеренных значений температур $T(x, n)$ и $T(x, m)$ определены зависимости для расчета параметров ТФС материалов λ и α :

$$\alpha = B_1 \exp\left(B_2 \frac{T_n}{T_m}\right); \quad \lambda = \frac{1}{T_m} B_3 \ln(B_4 \alpha),$$

где B_1, B_2, B_3, B_4 – константы, определяемые при градуировке ИИИС; T_n, T_m – значения температуры при подаче соответственно n и m импульсов.

Полученные измерительные данные сохраняются в базе знаний ИИИС, реализующей теплофизический метод измерения, и применяются при расчете ТФС материалов [9, 10]. Интеллектуальная информационно-измерительная система выполнена на основе персонального компьютера. В состав структуры системы входят: цифровой измерительный канал с интеллектуальным измерительным зондом, блок формирования тепловых воздействий для реализации теплофизических измерений, база знаний и блок принятия решений при идентификации измерительной ситуации в условиях неопределенности.

Предлагается подход к представлению результатов измерений коэффициентов λ и α в условиях неопределенности в виде ряда измеренных величин, которые включают предполагаемые значения измеряемого параметра на основе применения имеющихся сведений об исследуемом материале в базе знаний ИИИС с использованием вероятностного подхода, и величины, соответствующей неопределенности измерений. Формализованное описание измеряемой температуры в контактной области «измерительный зонд – исследуемый материал» при проведении теплофизических измерений выполнено с использованием закона равномерного распределения возможных значений температуры в заданных интервалах

(нижнем и верхнем) измеряемой величины для диапазонов теплопроводности: низкого $d1$ (0,02...0,2 Вт/(м·К)); среднего $d2$ (0,21...5,0 Вт/(м·К)); высокого $d3$ (0,51...10,0 Вт/(м·К)):

$$[T_{jнд1}; T_{jвд1}]; [T_{jнд2}; T_{jвд2}]; [T_{jнд3}; T_{jвд3}],$$

где T_{jn} , $T_{jв}$ – нижнее и верхнее значения измеренных температур для диапазонов теплопроводности материалов $d1$, $d2$, $d3$ соответственно.

Неопределенность измерения температуры $H(z_j)$ находится по зависимости

$$H(z_j) = \frac{T_{jn} - T_{jв}}{2\sqrt{3}},$$

где z_j – оценка j -й измеряемой величины [11].

Измеряемые параметры ТФС материалов $K_{ТФС}(\lambda, \alpha, c)$ определяются по следующему уравнению измерений с учетом неопределенности измерений:

$$K_{ТФС} = L_{ср} + L_{\delta ИИИС} + L_{\delta ТФС},$$

где $L_{ср}$ – значение среднего арифметического количества измерений,

$L_{ср} = \sum_{j=1}^l L_j / l$, здесь l – число измерений; L_j – измеренное значение $K_{ТФС}$;

$L_{\delta ИИИС}$ – поправка на погрешность измерительного канала ИИИС; $L_{\delta ТФС}$ – величина поправки, соответствующей допустимой погрешности измерений $K_{ТФС}$. Неопределенность измерений параметра $L_{ср}$ при нормальном распределении вероятностей устанавливается по зависимости [8]

$$H(L_{ср}) = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^l (L_j - L_{ср})^2}{l(l-1)}}.$$

Неопределенность допустимой погрешности измерений $L_{\delta ТФС}$ при прямоугольном распределении вероятности в интервале $\pm \delta_{ТФС}$ равна

$$H(L_{\delta ТФС}) = \frac{\delta_{ТФС}}{\sqrt{3}}.$$

При прямоугольном распределении вероятности результата измерений $L_{\delta ИИИС}$ в интервале $\pm \delta_{ИИИС}/2$ рассчитывается неопределенность измерительных данных

$$H(L_{\delta ИИИС}) = \frac{\delta_{ИИИС}}{2\sqrt{3}}.$$

Стандартная неопределенность параметров теплофизических свойств материалов $K_{ТФС}$ определяется по зависимости

$$H(K_{ТФС}) = \sqrt{H^2(L_{ср}) + H^2(L_{\delta ИИИС}) + H^2(L_{\delta ТФС})}.$$

Концептуальная модель формирования измерительной среды ИИИС ТФС материалов в условиях неопределенности

В зависимости от предметной области исследования формируется измерительная среда ИИИС для определения ТФС материалов из набора измерительных ситуаций в соответствии с концептуальной моделью (рис. 1).



Рис. 1. Концептуальная модель формирования измерительной среды ИИИС ТФС материалов

Для создания измерительной среды ИИИС необходимо выполнить анализ функциональных возможностей системы, имеющей априорной информации для различных предметных областей при неразрушающем контроле определяемых теплофизических свойств материалов (коэффициентов тепло- и температуропроводности, теплоемкости, теплоусвоения и др.), возможных видов измерительной ситуации.

Измерительная ситуация в условиях неопределенности формируется на основе следующих информационных данных: априорных сведений об исследуемом материале (теплопроводности, плотности, шероховатости поверхности); методе измерения (мощность воздействующего тепла на материал, время поступления тепловых импульсов, тип нагревателя); зависимости ТФС материалов от дестабилизирующих факторов (влажности и температуры окружающей среды, шероховатости поверхности материала).

Постановка задачи создания измерительной ситуации при функционировании ИИИС ТФС материалов в условиях неопределенности

Задача создания измерительной ситуации формулируется следующим образом.
Дано:

1. Множество существующих проблем E при создании измерительной ситуации, которые необходимо решить для повышения точности определения ТФС материалов.

2. Множество измерительных ситуаций $U = \{u_i, i = \overline{1, h}\}$, использующихся при проведении теплофизических измерений материалов с различными диапазонами теплопроводности.

3. Множество априорных данных о видах измерительных ситуаций $I_{ИС}$ и дестабилизирующих факторах окружающей среды $D_{ДФ}$.

4. Множество типов моделей измерительных ситуаций $M_{ИС}$ для их соответствующих видов.

5. Множество информационных связей W между компонентами массива информации при идентификации измерительной ситуации.

6. Вектор целевых показателей точности $R = (r_i, i = \overline{1, k})$, которые позволяют решать существующие проблемы создания измерительной ситуации на основе ее идентификации с учетом допустимых значений вектора целевых показателей точности $R_{доп} = (r_{iдоп}, i = \overline{1, k})$ при контроле R .

В формализованном виде массив исходной информации Y представлен кортежем длины восемь

$$Y = \langle E, G, I_{ИС}, D_{ДФ}, M_{ИС}, R, R_{доп}, W \rangle. \quad (2)$$

На основе массива информации (2) необходимо сформировать множество режимов функционирования ИИИС ТФС материалов $G = \{g_i, i = \overline{1, n}\}$ и возможных вариантов $U = \{u_i, i = \overline{1, p}\}$ при решении проблем E создания измерительных ситуаций. Из альтернативных вариантов требуется выбрать вариант измерительной ситуации $u \in U$, который обеспечивает минимальный риск $\mu(u)$ невыполнения условия $R(u) > R_{доп}$ [12 – 14].

Иначе $u = \arg \min \{ \mu(u), u \in U / Y, O, R(u) > R_{доп} \}$.

Постановка задачи идентификации измерительной ситуации ИИИС ТФС материалов

Идентификация измерительной ситуации осуществляется на основе определения ее структуры с использованием данных проведенных экспериментальных исследований при неразрушающем контроле ТФС твердых материалов различных диапазонов теплопроводности $d1, d2, d3$; сведений о методах контроля ТФС материалов в соответствии с диапазонами теплопроводности материалов; информации о режимных параметрах проведения теплофизических измерений для соответствующего диапазона теплопроводности объекта исследования (мощности теплового воздействия на исследуемый материал, количестве импульсов нагрева, их длительности и скважности, времени проведения эксперимента); данных о климатических условиях в течение экспериментов (температуре и влажности окружающей среды).

На основе заданного массива исходной информации (2) идентифицируется измерительная ситуация для материала с определенным диапазоном теплопроводности.

Сформулирована задача идентификации измерительной ситуации в формализованном виде.

Заданы:

- вид исследуемого материала по диапазону теплопроводности Θ ;
- множество видов измерительных ситуаций U_{Θ} ;
- априорная информация об измерительной ситуации $I_u = \{I(u), u \in U_{\Theta}\}$;
- совокупность требований к решению задач идентификации.

Следует определить наиболее вероятную измерительную ситуацию для соответствующего диапазона исследуемых материалов по теплопроводности, а также оценить риск Ψ планируемого результата выбора измерительной ситуации [15 – 18].

В формализованном виде задача идентификации измерительной ситуации представлена кортежем

$$\langle \Theta, U_{\Theta}, I_u, \Phi_u, \Psi_{\text{доп}} \rangle,$$

где $\Psi_{\text{доп}}$ – значение допустимого риска; Φ_u – алгоритм идентификации u

$$(u, \Psi(u)) = \Phi_u(\Theta, U_{\Theta}, I_u).$$

Задача идентификации измерительной ситуации выполнена при условии

$$\Psi(u) \leq \Psi_{\text{доп}}.$$

Алгоритм решения задачи идентификации измерительной ситуации

Для принятия решений при идентификации измерительной ситуации необходимо определить соответствие рассматриваемой ситуации к множеству допустимых ситуаций. В этом случае множество U_{Θ} разделяется на два подмножества

$$U_{\Theta} = U_0^{\Theta} \cup U_{\text{но}}^{\Theta}$$

где U_0^{Θ} , $U_{\text{но}}^{\Theta}$ – соответственно относящиеся и не относящиеся к определенному диапазону теплопроводности материалов измерительные ситуации.

Тогда ставится следующая задача идентификации измерительной ситуации. Используя информацию о $\Theta, U_{\Theta}, I_u, \Phi_u, \Psi_{\text{доп}}$, необходимо установить принадлежность измерительной ситуации u к подмножеству U_0^{Θ} или $U_{\text{но}}^{\Theta}$, а также оценить риск $\Psi(U^{\Theta})$.

При реализации алгоритма решения задачи идентификации измерительной ситуации кортеж

$$\langle \Theta, U_0^{\Theta}, U_{\text{но}}^{\Theta}, I_u, \Phi_u, \Psi_{\text{доп}} \rangle$$

представляется следующим образом

$$(U^{\Theta}, \Psi(U_{\Theta})) = \Phi_u(\Theta, U_0^{\Theta}, U_{\text{но}}^{\Theta}, I_u).$$

Сформулированные задачи идентификации характеризуются следующим:

- 1) неоднозначностью определения структуры измерительной ситуации;
- 2) нечеткостью и неопределенностью применяемых информационных данных;
- 3) временной информационной распределенностью по источникам данных при идентификации измерительной информации.

Информационная модель идентификации измерительной ситуации при функционировании ИИИС ТФС материалов

Эффективность функционирования ИИИС зависит от многих факторов, одним из которых является пополнение информационной среды измерительной системы новой и достоверной информацией для соответствующей предметной области при идентификации измерительной ситуации.

Структурная схема информационной модели для идентификации и выбора измерительной ситуации и пополнения информационной среды ИИИС ТФС материалов приведена на рис. 2.

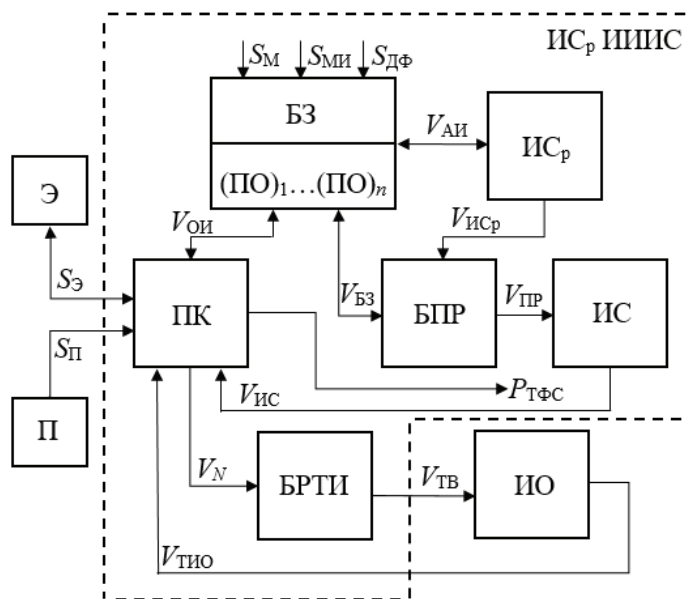


Рис. 2. Информационная модель идентификации и выбора измерительной ситуации ИИИС ТФС материалов:

ИС_р ИИИС – информационная среда ИИИС; Э – эксперт; П – пользователь; БЗ – база знаний; ПК – персональный компьютер; БПР, БРТИ – блоки принятия решений и реализации теплофизических измерений соответственно; ИС – измерительная ситуация; ИО – исследуемый объект; (ПО)₁... (ПО)_n – предметная область, *n* – число предметных областей; S_{ми} – информация о методе измерения параметров ТФС; S_{дф} – информация о дестабилизирующих факторах; S_м – априорные сведения об исследуемом материале; S_э, S_п – сведения эксперта и пользователя соответственно; V_{ои} – процесс обмена информацией; V_{иср} – формирование измерительной среды с использованием сведений базы знаний; V_{пр} – принятие решений на основе информации базы знаний; V_{ис} – передача информации об измерительной ситуации в персональный компьютер; P_{тфс} – параметры ТФС; V_{тио} – информация о температуре исследуемого объекта; V_н – сведения о мощности теплового воздействия на исследуемый материал; V_{тв} – информация о параметрах теплового воздействия на объект исследования; V_{аи} – априорная информация, хранящаяся в базе знаний ИИИС

Принятие решений об идентификации и выборе измерительной ситуации при проведении теплофизических измерений материалов соответствующего диапазона теплопроводности осуществляется с использованием блока принятия решений. При этом персональный компьютер обрабатывает данные информационной среды ИИИС в зависимости от предметной области исследования, поступающие из базы знаний, и измерительную информацию, передаваемую с объекта исследования при реализации метода неразрушающего контроля ТФС материалов (1).

Результаты экспериментальных исследований ИИИС ТФС материалов

Организованы и проведены эксперименты по определению теплофизических свойств материалов в диапазонах теплопроводности низкой, средней, высокой, соответственно *d1*, *d2*, *d3* при идентификации измерительной ситуации и функционировании информационно-измерительной системы в условиях неопределенности. В качестве образцовой меры использован полиметилметакрилат (ПММ). Данные экспериментов приведены в табл. 1.

Таблица 1

**Экспериментальные данные и погрешность результатов измерений
теплофизических свойств материалов**

Материал	Температуропроводность $\alpha \cdot 10^{-7}, \text{ м}^2/\text{с}$	Теплопроводность λ , Вт/(м·К)	Погрешность измерений, %	
			δ_α	δ_λ
Стеклянная вата	9,7 / 10,0	0,039 / 0,038	3,09	2,56
Древесно-волокнистая плита	3,9 / 3,70	0,120 / 0,125	5,12	4,17
ПММ	1,09 / 1,06	0,195 / 0,189	2,75	3,08
Кирпич красный	15,1 / 14,5	0,330 / 0,340	3,97	3,03
Мрамор	41,3 / 43,0	0,960 / 0,920	4,12	4,17

Примечание. В числителе – сведения из нормативных документов; в знаменателе – результат экспериментов.

На основании данных экспериментов по измерению ТФС материалов в условиях неопределенности с предварительной идентификацией измерительной ситуации в ИИИС, использования результатов оценки неопределенности измерений и проведенного метрологического анализа полученных результатов следует вывод о повышении точности определения ТФС материалов с различными диапазонами теплопроводности.

Заключение

Предложенный подход для оценки неопределенности измерения ТФС материалов позволяет обеспечить достоверность определения температуры при проведении теплофизических измерений и повысить точность определения ТФС материалов с использованием результатов оценки неопределенности, что подтверждено результатами экспериментальных исследований интеллектуальной системы теплофизических измерений, функционирующей в условиях неопределенности.

Представление данных измерений в формализованном виде с учетом оценки неопределенности измерительной ситуации позволяет уменьшить относительную погрешность определения теплофизических свойств материалов до 2 – 4 %.

Созданная измерительная среда ИИИС ТФС материалов с применением концептуальной модели используется при формировании множества измерительных ситуаций.

Выполненные формализованные постановки задач создания и идентификации измерительной ситуации позволяют выбрать наиболее предпочтительную измерительную ситуацию с адаптацией к диапазону исследуемого материала по теплопроводности и провести оценку риска при планировании результатов выбора измерительной ситуации.

Применение результатов решения оптимизационной задачи для идентификации измерительной ситуации при проведении теплофизических измерений способствует снижению рисков при обеспечении точности контроля ТФС материалов.

Рекомендуется использование результатов данного исследования при неразрушающем контроле параметров теплофизических свойств материалов интеллектуальной информационно-измерительной системой для повышения качества выпускаемой продукции на предприятии-изготовителе.

Список литературы

1. Hofmann, D. Theoretical, Physical and Metrological Problems of Further Development of Measurement Techniques and Instrumentation in Science and Technology / D. Hofmann, Y. V. Tarbeyev // АСТА ИМЕКО. – 2014. – Vol. 3, No. 1. – P. 23 – 31. doi:10.21014/acta_imeko.v3i1.193

2. Люгер, Д. Ф. Искусственный интеллект. Стратегии и методы решения сложных проблем / Д. Ф. Люгер ; пер. с англ. Н. И. Галагана. – 4-е изд. – М. : Вильямс, 2003. – 864 с.

3. Development of the Method of Software Temperature Compensation for Wireless Temperature Measuring Electronic Instruments / Y. I. Shtern, I. S. Karavaev, V. M. Rykov [et al.] // International Journal of Control Theory and Applications. – 2016. – Vol. 9, No. 30. – P. 139 – 146.

4. Раннев, Г. Г. Интеллектуальные средства измерений / Г. Г. Раннев. – М. : Академия, 2011. – 272 с.

5. Maglic, D. K. Standartizet Methods for the Measurement of Thermophysical Properties / D. K. Maglic // High Pressures. – 1979. – Vol. 11. – P. 1 – 8.

6. Половников, В. Ю. Кондуктивно-конвективный теплоперенос в тонкопленочной тепловой изоляции / В. Ю. Половников // Изв. Томского политехн. ун-та. Инжиниринг георесурсов. – 2020. – Т. 331, № 4. – С. 64 – 69. doi: 10.18799/24131830/2020/4/2594

7. Laghi, L. Uncertainty Analysis of Thermal Conductivity Measurements in Materials for Energy-Efficient Buildings / L. Laghi, F. Pennecchi, G. Raiteri // International Journal of Metrology and Quality Engineering. – 2011. – Vol. 2, No. 2. – P. 141 – 151. doi: 10.1051/ijmqe/2011102

8. ГОСТ ISO/IEC 17025–2019. Общие требования к компетентности испытательных и калибровочных лабораторий. – Взамен ГОСТ ISO/IEC 17025–2009 ; введ. 2019-09-01. – М. : Стандартиформ, 2021. – 31 с.

9. Селиванова, З. М. Интеллектуальная информационно-измерительная система дистанционного контроля теплофизических свойств теплоизоляционных материалов в условиях воздействия дестабилизирующих факторов / З. М. Селиванова, Д. С. Куренков // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2020. – Т. 26, № 1. – С. 6 – 19. doi: 10.17277/vestnik.2020.01.pp.006-019

10. Методы определения теплопроводности и температуропроводности / А. Г. Шашков, Г. М. Волохов, Т. Н. Абраменко, В. П. Козлов ; под ред. А. В. Лыкова. – М. : Энергия, 1973. – 336 с.

11. Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement / International Organization for Standardization. – Genève, Switzerland, 1993. – 101 p.

12. Белешев, С. Д. Экспертные оценки / С. Д. Белешев, Ф. Г. Гуревич. – М. : Наука, 1973. – 161 с.

13. Айзерман, М. А. Выбор вариантов: основы теории / М. А. Айзерман, Ф. Т. Алескеров. – М. : Наука, 1990. – 240 с.

14. Таха, Х. А. Введение в исследование операций / Х. А. Таха ; пер. с англ. А. А. Минько. – 7-е изд. – М. : Вильямс, 2007. – 912 с.

15. Беляев, Л. С. Решение сложных оптимизационных задач в условиях неопределенности / Л. С. Беляев. – Новосибирск : Наука, 1978. – 126 с.

16. Pilcher, R. *Appraisal and Control of Project Costs* / R. Pilcher. – London : McGraw-Hill, 1973. – 324 p.
17. Lichtenberg, S. *Experiences from a New Logis in Projects Management* / S. Lichtenberg // *Dimensions of Projects Management* / Eds. H. Reschke [et al.]. – Berlin, Heidelberg : Spriger-Verlag, 1990. – P. 137 – 154.
18. Pincus, C. *A Workshop Approach to Projects Execution Planning* / C. Pincus // *Projects Management* / Eds. R. L. Kimmons, J. H. Loveree. – New York : Marsel Dekker, 1989. – P. 349 – 355.
-

Identification of the Measuring Situation when Determining Thermal Properties of Solid Materials under Uncertainty

Z. M. Selivanova, K. V. Skomorokhov

*Department of Design of Radio-Electronic and Microprocessor Systems,
selivanova_zm@mail.ru; TSTU, Tambov, Russia*

Keywords: identification; measuring situation; intelligent measuring system; measurement uncertainty; thermophysical properties.

Abstract: The main factors characterizing the uncertainty of the measuring situation during thermophysical measurements are considered. An approach is proposed for determining the parameters of the thermophysical properties of materials and the measurement error under uncertainty. A conceptual model of the formation of a measuring environment for an intelligent information-measuring system of thermophysical properties of materials in a situation of uncertainty has been created. The solution of the optimization problem of identification of the measuring situation when determining the thermophysical properties of solid materials of various ranges of thermal conductivity is presented. An information model has been developed to identify a measurement situation in an intelligent information and measurement system operating under conditions of uncertainty.

References

1. Hofmann D., Tarbeye Y.V. Theoretical, Physical and Metrological Problems of Further Development of Measurement Techniques and Instrumentation in Science and Technology, *ACTA IMEKO*, 2014, vol. 3, no. 1, pp. 23-31, doi:10.21014/acta_imeko.v3i1.193
2. Luger D.F. *Artificial Intelligence: Structures and Strategies for Complex Problem Solving*, Boston, 2003, 864 p.
3. Shtern Y.I., Karavaev I.S., Rykov V.M., Shtern M.Y., Rogachev M.S. Development of the Method of Software Temperature Compensation for Wireless Temperature Measuring Electronic Instruments, *International Journal of Control Theory and Applications*, 2016, vol. 9, no. 30, pp. 139-146.
4. Rannev G.G. *Intellektual'nyye sredstva izmereniy* [Intelligent measuring instruments], Moscow: Akademiya, 2011, 272 p. (In Russ.)
5. Maglic D.K. Standartized Methods for the Measurement of Thermophysical Properties, *High Pressures*, 1979, vol. 11, pp. 1-8.
6. Polovnikov V.Yu. [Conductive-convective heat transfer in thin-film thermal insulation], *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov* [Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Engineering of georesources], 2020, vol. 331, no. 4, pp. 64-69, doi: 10.18799/24131830/2020/4/2594 (In Russ., abstract in Eng.)

7. Laghi L., Pennecci F., Raiteri G. Uncertainty Analysis of Thermal Conductivity Measurements in Materials for Energy-Efficient Buildings, *International Journal of Metrology and Quality Engineering*, 2011, vol. 2, no. 2, pp. 141-151, doi: 10.1051/ijmqe/2011102

8. GOST ISO/IEC 17025–2019. *Obshchiye trebovaniya k kompetentnosti ispytatel'nykh i kalibrovochnykh laboratoriy* [GOST ISO / IEC 17025-2019. General requirements for the competence of testing and calibration laboratories], Moscow: Standartinform, 2021, 31 p. (In Russ.)

9. Selivanova Z.M., Kurenkov D.S. [Intelligent information-measuring system for remote control of thermophysical properties of heat-insulating materials under the influence of destabilizing factors], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2020, vol. 26, no. 1, pp. 6-19, doi: 10.17277/vestnik.2020.01.pp.006-019 (In Russ., abstract in Eng.)

10. Shashkov A.G., Volokhov G.M., Abramenko T.N., Kozlov V.P., Lykov A.V. [Ed.] *Metody opredeleniya teploprovodnosti i temperaturoprovodnosti* [Methods for determining thermal conductivity and thermal diffusivity], Moscow: Energiya, 1973, 336 p. (In Russ.)

11. *Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement*, Genève, Switzerland, 1993, 101 p.

12. Beleshev S.D., Gurevich F.G. *Ekspertnyye otsenki* [Expert estimates], Moscow: Nauka, 1973, 161 p. (In Russ.)

13. Ayzerman M.A., Aleskerov F.T. *Vybor variantov: osnovy teorii* [Choice of options: the foundations of the theory], Moscow: Nauka, 1990, 240 p. (In Russ.)

14. Taha H.A. *Operations Research: An introduction*, New Jersey: Pearson Education, 2003.

15. Belyayev L.S. *Resheniye slozhnykh optimizatsionnykh zadach v usloviyakh neopredelennosti* [Solution of complex optimization problems in conditions of uncertainty], Novosibirsk: Nauka, 1978, 126 p. (In Russ.)

16. Pilcher R. *Appraisal and Control of Project Costs*, London: McGraw-Hill, 1973, 324 p.

17. Lichtenberg S., Reschke H. [et al.] [Eds.] *Dimensions of Projects Management*, Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 1990, pp. 137-154.

18. Pincus C., Kimmons R.L., Loveree J.H. [Eds.] *Projects Management*, New York: Marsel Dekker, 1989, pp. 349-355.

Identifizierung der Messsituation bei der Bestimmung der thermophysikalischen Eigenschaften von festen Materialien unter Bedingungen der Unsicherheit

Zusammenfassung: Es sind die wesentlichen Faktoren betrachtet, die die Unsicherheit der Messsituation bei thermophysikalischen Messungen charakterisieren. Es ist ein Ansatz zur Bestimmung der Parameter der thermophysikalischen Eigenschaften von Materialien und des Messfehlers unter Unsicherheit vorgeschlagen. Ein konzeptionelles Modell zur Bildung der Messumgebung für das intelligente Informationsmesssystem thermophysikalischer Materialeigenschaften in einer Unsicherheitssituation ist erstellt. Die Lösung des Optimierungsproblems der Ermittlung der Messsituation bei der Bestimmung der thermophysikalischen Eigenschaften von Feststoffen verschiedener Wärmeleitfähigkeitsbereiche ist vorgestellt. Es ist ein Informationsmodell entwickelt, das verwendet wird, um eine Messsituation in einem intelligenten Informations- und Messsystem zu identifizieren, das unter Unsicherheitsbedingungen arbeitet.

Identification de la situation de mesure dans la détermination des propriétés thermiques et physiques des matériaux solides dans des conditions de l'indétermination

Résumé: Sont examinés les principaux facteurs caractérisant l'indétermination de la situation de mesure lors des mesures thermophysiques. Est proposée une approche pour déterminer les paramètres des propriétés thermophysiques des matériaux et des erreurs de mesure dans les conditions d'indétermination. Est créé un modèle conceptuel de la formation de l'environnement de mesure du système d'information et de mesure intelligent des propriétés thermiques et physiques des matériaux dans une situation d'indétermination. Est présentée la solution du problème d'optimisation de l'identification de la situation de mesure dans la détermination des propriétés thermophysiques des matériaux solides de différentes plages de la conductivité thermique. Est mis au point un modèle d'information pour identifier la situation de mesure dans un système intelligent d'information et de mesure fonctionnant dans des conditions d'indétermination.

Авторы: *Селиванова Зоя Михайловна* – доктор технических наук, профессор кафедры «Конструирование радиоэлектронных и микропроцессорных систем»; *Скоморохов Кирилл Викторович* – аспирант кафедры «Конструирование радиоэлектронных и микропроцессорных систем», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.

Рецензент: *Муромцев Дмитрий Юрьевич* – доктор технических наук, профессор кафедры «Конструирование радиоэлектронных и микропроцессорных систем», проректор по научной работе, ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.