**ПОВЫШЕНИЕ ОПЕРАТИВНОСТИ КОНТРОЛЯ
ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ
ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ
ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ ИНФОРМАЦИОННО-
ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМОЙ**

**З. М. Селиванова¹, Д. С. Куренков¹,
В. Ф. Калинин², И. И. Пасечников³**

*Кафедры: «Конструирование радиоэлектронных
и микропроцессорных систем» (1), «Электроэнергетика» (2),
ФГБОУ ВО «ТГТУ»; г. Тамбов, Россия; selivanova@mail.jesby.tstu.ru;
кафедра теоретической и экспериментальной физики (3),
ФГБОУ ВО «ТГУ имени Г. Р. Державина», г. Тамбов, Россия*

Ключевые слова: импульсное тепловое воздействие; интеллектуальная информационно-измерительная система; оперативность контроля; теплофизические свойства материалов.

Аннотация: Разработан метод повышения оперативности контроля теплофизических свойств теплоизоляционных материалов, заключающийся в том, что при проведении теплофизических измерений предложенная интеллектуальная информационно-измерительная система с использованием созданных модулей алгоритмического и программного обеспечений осуществляет выбор оптимальных интервалов между теплофизическими измерениями в зависимости от измерительной ситуации, предварительно определяемой по тестовой термограмме, что позволяет повысить оперативность определения коэффициентов тепло- и температуропроводности в 3 – 5 раз с относительной погрешностью не более 5 %.

Важной задачей при производстве теплоизоляционных материалов и изделий, для которых необходим контроль теплофизических свойств (ТФС) в соответствии с нормативными документами, регламентирующими выпуск продукции, является обеспечение не только точности контролируемых параметров ТФС материалов, но и оперативности проведения теплофизических измерений.

Анализ существующих методов определения ТФС твердых материалов при импульсном тепловом воздействии на исследуемый материал (ИМ) показывает, что существенный их недостаток – низкая оперативность. В связи с этим определена цель данной работы, которая заключается в повышении оперативности импульсного метода линейного источника тепла при определении ТФС теплоизоляционных материалов.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи: создать оперативный метод неразрушающего контроля параметров ТФС материалов и изделий – коэффициентов тепло- и температуропроводности и интеллектуальную информационно-измерительную систему (ИИИС) для его реализации.

Решение поставленных задач основано на использовании теорий теплопроводности и систем, методов искусственного интеллекта.

Постановка задачи разработки метода повышения оперативности контроля ТФС теплоизоляционных материалов

Дано: N исследуемых теплоизоляционных материалов с различными диапазонами теплопроводности для рассматриваемых классов, Вт/(м·К): низкой $K_n - \lambda = 0,03 \dots 0,06$; средней $K_c - \lambda = 0,07 \dots 0,12$; высокой $K_v - \lambda = 0,13 \dots 0,2$. Требуется определить оптимальный временной интервал $t_{\text{инт}}$ между теплофизическими измерениями для исследуемого материала соответствующего диапазона теплопроводности в целях повышения оперативности определения ТФС теплоизоляционных материалов в 3 – 5 раз при обеспечении относительной погрешности измерения коэффициентов тепло- и температуропроводности δ_λ и δ_α не более 5 %.

Контроль параметров ТФС теплоизоляционных материалов – коэффициентов тепло- и температуропроводности λ и α соответственно, осуществляется в результате нагрева объекта исследования тепловыми импульсами, подаваемыми на линейный нагреватель измерительного зонда ИИИС, записи полученных температурно-временных зависимостей (термограмм) в контактной области зонда и исследуемого изделия в базу знаний измерительной системы, на основе которых выполняется расчет λ и α ИИИС.

Для определения параметров ТФС теплоизоляционных материалов в ИИИС используется метод при действии линейного мгновенного источника тепла в контактной области двух полуограниченных тел. Решение задачи теплопроводности в результате воздействия мгновенного линейного источника тепла, при котором осуществляется распространение тепла на теплоизолированной поверхности полубесконечного в тепловом отношении тела, представлено в следующем виде [1 – 3]:

$$T(x, \tau) = \frac{Q}{4\pi\lambda\tau} \exp\left(-\frac{x^2}{4\alpha\tau}\right), \quad (1)$$

где $T(x, \tau)$ – температура; Q – мощность теплового воздействия; τ – время; x – расстояние от точки контроля до линейного источника тепла.

В результате подачи n -го импульса в моменты контроля n и m при частотно-импульсном тепловом воздействии на теплоизоляционный материал осуществляется расчет температуры $T(x, \tau)$ (1) по зависимости

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

где F – заданная частота тепловых импульсов.

Получены формулы для определения λ и α на основе (2) по данным температур $T(x, n)$ и $T(x, m)$ [2] в результате проведенных теплофизических измерений:

$$\alpha = B_1 \exp\left(B_2 \frac{T_n}{T_m}\right); \quad \lambda = \frac{1}{T_m} B_3 \ln(B_4 \alpha), \quad (3)$$

где $B_1 - B_4$ – калибровочные коэффициенты.

В известных методах определения ТФС теплоизоляционных материалов тепловое импульсное воздействие на исследуемый материал линейным источником тепла осуществляется до наступления установившегося теплового режима в контактной области измерительного зонда ИИИС и объекта контроля ТФС. В результате экспериментальных исследований показатель достижения установившегося

теплового режима может изменяться в зависимости от класса исследуемого материала по теплопроводности и интервала между проводимыми теплофизическими измерениями. Термограммы измерений ТФС исследуемых теплоизоляционных материалов (полиметилметакрилата (ПММ), рипора, войлока и газосиликата) с использованием ИИИС представлены на рис. 1.

Из анализа термограмм следует, что интервал между измерениями влияет на показатель достижения установившегося теплового режима для исследуемых материалов, как при проведении теплофизических измерений, так и при остывании материалов после окончания измерения (рис. 2). Термограммы позволяют установить, что остывание подложки измерительного зонда осуществляется за различное время в зависимости от формируемой мощности теплового воздействия на исследуемый материал при проведении теплофизических измерений и класса по теплопроводности.

Рис. 1. Термограммы теплоизоляционных материалов для различных интервалов $t_{\text{инт}}$ между теплофизическими измерениями

Рис. 2. Термограммы остывания подложки измерительного зонда после проведения теплофизического измерения

Получены экспериментальные зависимости изменения значений коэффициентов тепло- и температуропроводности исследуемых теплоизоляционных материалов от временных интервалов между теплофизическими измерениями $\lambda = f(t_{\text{инт}})$ и $\alpha = f(t_{\text{инт}})$ ИИИС, представленные на рис. 3 и 4.

Рис. 3. Зависимости значений $\lambda = f(t_{\text{инт}})$ для исследуемых материалов:
а – ПИММ; б – рипора; в – газосиликата; г – войлока

Рис. 4. Зависимости значений $\alpha = f(t_{\text{инт}})$ для исследуемых материалов:
а – ПИММ; б – рипора; в – газосиликата; г – войлока

На основе экспериментальных данных выполнены расчеты относительной погрешности измерения коэффициентов тепло- и температуропроводности и установлена зависимость погрешности измерения от временных интервалов между теплофизическими измерениями теплоизоляционных материалов с различной теплопроводностью. Полученные графики зависимостей $\delta_\lambda = f(t_{\text{инт}})$ и $\delta_\alpha = f(t_{\text{инт}})$ представлены на рис. 5.

Установлено, что для материалов с большей теплопроводностью необходимо выбирать интервал между измерениями на основе анализа относительной погрешности измерения теплопроводности, допустимая погрешность измерения при этом составляет не более 5 % [4, 5].

Предложенный подход применяется в разработанной ИИИС для повышения оперативности контроля параметров ТФС теплоизоляционных материалов и изделий при минимизации погрешности результатов измерения.

Проведена оценка потерь точности и оперативности при контроле ТФС материалов ИИИС в результате нерационального выбора временного интервала при проведении теплофизических измерений, используя показатели оперативности $\Pi_{\text{оп}}$, точности $\Pi_{\text{т}}$. Показателем точности $\Pi_{\text{т}}$ является погрешность измерений, а время измерения параметров ТФС материалов применяется в качестве показателя оперативности $\Pi_{\text{оп}}$.

Рис. 5. Зависимости изменения относительной погрешности измерения коэффициентов теплопроводности $\delta_\lambda = f(t_{\text{инт}})$ (а) и температуропроводности $\delta_\alpha = f(t_{\text{инт}})$ (б) теплоизоляционных материалов:

1 – ПММ; 2 – рипор; 3 – газосиликат; 4 – войлок

Зависимость потерь оперативности $\Pi_{\text{оп}} = f(t_{\text{инт}})$ от временного интервала $t_{\text{инт}}$ между измерениями определяется, в основном, диапазонами теплопроводности исследуемых теплоизоляционных материалов

$$\Pi_{\text{оп}} = f_{\text{оп}}(K_d, t_{\text{инт}}).$$

Зависимость потерь точности $\Pi_{\text{т}} = f(t_{\text{инт}})$ от временного интервала $t_{\text{инт}}$ между измерениями учитывает воздействующие дестабилизирующие факторы $P_{\text{ДФ}}$ и диапазоны теплопроводности исследуемых материалов K_d

$$\Pi_{\text{т}} = f_{\text{т}}(t_{\text{инт}}, P_{\text{ДФ}}, K_d).$$

Расчетно-экспериментальным методом получены графические зависимости показателей потерь оперативности и точности при определении коэффициентов тепло- и температуропроводности рипора при различных $t_{\text{инт}}$, представленные на рис. 6.

Анализ графических зависимостей, приведенных на рис. 1 – 6, позволяет определить, что для каждого исследуемого материала определенного диапазона теплопроводности можно установить оптимальный временной интервал $t_{\text{инт}}$, при котором заданный критерий, комплексно учитывающий потери оперативности и точности, будет минимальным

$$J(t_{\text{инт}}, K_d) = [C_1 \Pi_{\text{т}}(t_{\text{инт}}, P_{\text{ДФ}}, K_d) + C_2 \Pi_{\text{оп}}(K_d, t_{\text{инт}})] \rightarrow \min_{t_{\text{инт}}, K_d}, \tag{4}$$

где C_1, C_2 – весовые коэффициенты.

Рис. 6. Графики зависимостей показателей потерь оперативности $\Pi_{\text{оп}} = f(t_{\text{инт}})$ (а) и точности $\Pi_{\text{т}} = f(t_{\text{инт}})$ (б) при определении ТФС рипора для различных $t_{\text{инт}}$

Выбор оптимального (рационального) временного интервала при проведении теплофизических измерений осуществляется в результате идентификации измерительной ситуации. Под измерительной ситуацией понимается совокупность оптимальных режимных параметров при проведении теплофизических измерений, которые формируются после проведения тестового теплофизического измерения и снятия термограммы.

По результатам тестовой термограммы определяется измерительная ситуация с использованием методов искусственного интеллекта (применения теорий нечетких множеств, распознавания образов) в зависимости от вида исследуемых материалов по теплопроводности в диапазоне $0,02 \dots 0,2$ Вт/(м·К).

При формировании измерительной ситуации выбираются алгоритм измерения, временной интервал между измерениями, и определяется мощность теплового воздействия на объект исследования согласно классу материала по теплопроводности.

Постановка задачи выбора оптимального временного интервала $t_{\text{инт}}$ между теплофизическими измерениями

Формируются следующие множества:

– множество, характеризующее диапазоны теплопроводности теплоизоляционных материалов

$$\mathbf{V}_T = \{V_e^T, e = 1, \dots, k_T\}; \quad (5)$$

– множество информации о влияющих факторах окружающей среды (ОС)

$$\mathbf{V}_\Phi = \{V_{T_{\text{OC}}}^\Phi, V_{W_{\text{OC}}}^\Phi, V_\Psi^\Phi\}, \quad (6)$$

где $V_{T_{\text{OC}}}^\Phi, V_{W_{\text{OC}}}^\Phi$ – температура и влажность окружающей среды соответственно;

V_Ψ^Φ – шероховатость поверхности исследуемого материала;

– множество сведений о виде информации

$$\mathbf{V}_И = \{V_{\text{неч}}, V_{\text{неопр}}, V_{\text{дет}}\}, \quad (7)$$

где $V_{\text{неч}}, V_{\text{неопр}}, V_{\text{дет}}$ – информация нечеткая, неопределенная, детерминированная соответственно;

– множество интервалов между теплофизическими измерениями в зависимости от класса исследуемых материалов

$$\mathbf{V}_{\text{инт}} = \{V_i^{\text{инт}}, i = 1, \dots, k_{\text{инт}}\}, \quad (8)$$

где $V_i^{\text{инт}}$ – i -й интервал между теплофизическими измерениями.

С использованием множеств (5) – (7) необходимо установить оптимальный интервал $V_k^{\text{инт}} \in \mathbf{V}_{\text{инт}}$, соответствующий представленным сведениям.

Поставленная задача основана на решении частных задач: формирование модели «измерительная ситуация – оптимальный интервал» (ИС – ОИ) и идентификация измерительной ситуации при создании базы знаний ИИИС и в процессе теплофизических измерений.

Применение декартова произведения множеств (5) – (7) позволяет сформировать множество $\mathbf{B}$

$$\mathbf{B} = \mathbf{V}_T \times \mathbf{V}_\Phi \times \mathbf{V}_И = \{b_{i,j,s}, i = \overline{1, k}; j \in \{T_{\text{OC}}, W_{\text{OC}}, \Psi\}; s \in (\text{неч}, \text{неопр}, \text{дет})\}. \quad (9)$$

Измерительные ситуации соответствуют элементам множества $\mathbf{B} - b_{i,j,s}$, которые задаются кортежами длины три

$$b_{i,j,s} = \langle \mathbf{V}_i^T \times \mathbf{V}_j^\Phi \times \mathbf{V}_s^H \rangle.$$

При работе измерительной системы возможно изменение множества (9) в результате коррекции (5) – (8).

При построении модели «ИС – ОИ» в множестве $\mathbf{B}$ выделяется k подмножеств B_i , $i = \overline{1, k}$, для которых реализуются следующие условия, означающие, что решается задача разделения множества $\mathbf{B}$ на k непересекающихся подмножеств:

1) $B_i \cap B_j = \emptyset$, $i, j = \overline{1, k}$, $i \neq j$, то есть пересечение любых пар подмножеств $B_i \subset \mathbf{B}$, $B_j \subset \mathbf{B}$ соответствует пустому множеству;

2) $\bigcap_{i=1}^k B_i = \mathbf{B}$, то есть каждая измерительная ситуация $b_{i,j,s}$ соответствует элементу подмножества B_i , $i = \overline{1, k}$;

3) один оптимальный интервал измерения следует применять для подмножества B_i .

Приведенное разделение множества $\mathbf{B}$ позволяет разработать модель «ИС – ОИ» в виде продукционных правил:

ЕСЛИ $b_{i,j,s} \in B_1$, ТО применять оптимальный интервал $V_1^{\text{инт}}$;

ЕСЛИ $b_{i,j,s} \in B_k$, ТО применять оптимальный интервал $V_k^{\text{инт}}$.

На основе анализа имеющейся информации об исследуемых теплоизоляционных материалах и полученной при экспериментальных исследованиях ИИИС сформировано подмножество $\mathbf{V}'_{\text{инт}} \subseteq \mathbf{V}_{\text{инт}}$, которое позволяет обеспечить выполнение ограничений на погрешность определения коэффициентов тепло- и температуропроводности $\delta_\lambda = \delta_\alpha$ и оперативность измерения параметров ТФС материалов $t_{\text{инт}}$:

$$\delta_\lambda(\mathbf{V}'_{\text{инт}}/\mathbf{V}_T, \mathbf{V}_\Phi, \mathbf{V}_H) \leq \delta_{\lambda_{\text{доп}}};$$

$$\delta_\alpha(\mathbf{V}'_{\text{инт}}/\mathbf{V}_T, \mathbf{V}_\Phi, \mathbf{V}_H) \leq \delta_{\alpha_{\text{доп}}};$$

$$t_{\text{инт}}(\mathbf{V}'_{\text{инт}}/\mathbf{V}_T, \mathbf{V}_\Phi, \mathbf{V}_H) \leq t_{\text{инт. доп}},$$

где $\delta_{\lambda_{\text{доп}}}$, $\delta_{\alpha_{\text{доп}}}$ – допустимые значения относительных погрешностей определения λ и α соответственно; $t_{\text{инт. доп}}$ – допустимый оптимальный интервал между теплофизическими измерениями, позволяющий обеспечить погрешность измерения λ и α не более 5 %.

Разработанный метод повышения оперативности определения параметров ТФС реализован в созданной ИИИС, представленной на рис. 7.

Интеллектуальная информационно-измерительная система ТФС материалов разработана на базе PIC микроконтроллера фирмы MICROCHIP (США), который выполняет функции приема и обработки полученной измерительной информации с цифрового измерительного канала (ЦИК) о температуре в области контакта измерительного зонда системы и исследуемого материала, реализации созданного метода повышения оперативности контроля коэффициентов тепло- и температуропроводности ИМ с использованием созданных базы знаний и блока принятия решений.

Рис. 7. Структурная схема ИИИС оперативного неразрушающего контроля ТФС теплоизоляционных материалов

Для повышения точности и достоверности результатов измерения контролируемых параметров выполнена цифровизация измерительного канала ИИИС, а также аналого-цифровая коррекция ЦИК на воздействие внешних факторов. Полученная измерительная информация обрабатывается с использованием разработанного программного обеспечения ИИИС.

Интеллектуальная процедура при оценке измерительной ситуации, принятии решений о выборе алгоритма и оптимальных режимных параметров при проведении теплофизических измерений согласно классу теплопроводности ИМ (мощность теплового воздействия, оптимальный временной интервал $t_{\text{инт}}$) осуществляется блоком принятия решений. При принятии решений выполняются анализ предварительной тестовой термограммы исследуемого материала и оценка относительной погрешности результатов теплофизического измерения [6 – 8].

В базе знаний ИИИС представлена информация о теплофизических свойствах исследуемых теплоизоляционных материалах, характеристика каждой возможной измерительной ситуации, совокупность алгоритмов измерений в соответствии с измерительной ситуацией, аппроксимирующие функции зависимости параметров ТФС от влияющих внешних факторов, алгоритмы принятия решений ИИИС, если присутствует неопределенность измерений. База знаний ИИИС также содержит: значения зависимостей потерь точности $\Pi_T = f(t_{\text{инт}})$ и оперативности $\Pi_{\text{оп}} = f(t_{\text{инт}})$ ИМ при различных временных интервалах; методику расчета оптимальных временных интервалов $t_{\text{инт}}$ согласно выбранным весовым коэффициентам ИМ (4); соответствующие рекомендации по выбору интервала измерений $t_{\text{инт}}$ для исследуемых материалов.

Выполнены экспериментальные исследования разработанной ИИИС, в которой применяется созданный метод повышения оперативности определения ТФС материалов и изделий. В таблице 1 приведены результаты расчета относительных погрешностей δ_λ , δ_α измерения параметров ТФС исследуемых теплоизоляционных материалов – коэффициентов тепло- и температуропроводности λ и α , при различных интервалах измерений $t_{\text{инт}}$. При расчете относительной погрешности использованы справочные значения для следующих материалов: ПММ,

Таблица 1

**Результаты измерений коэффициентов
тепло- и температуропроводности теплоизоляционных материалов
при различных временных интервалах**

$t_{\text{инт}}$, мин	$\lambda \cdot 10^{-1}$, Вт/(м·К)	$\alpha \cdot 10^{-7}$, м ² /с	δ_{λ} , %	δ_{α} , %	$\lambda \cdot 10^{-1}$, Вт/(м·К)	$\alpha \cdot 10^{-7}$, м ² /с	δ_{λ} , %	δ_{α} , %
	<i>ПММ</i>				<i>Рипор</i>			
1	2,055	1,157	5,38	6,15	0,297	4,947	6,07	7,31
2	2,031	1,144	4,21	4,95	0,295	4,894	5,35	6,16
3	2,022	1,131	3,69	3,76	0,292	4,817	4,29	4,49
4	2,011	1,129	3,13	3,58	0,291	4,791	3,93	3,93
5	1,996	1,124	2,36	3,12	0,289	4,752	3,21	3,08
6	1,984	1,118	1,74	2,57	0,288	4,721	2,86	2,41
7	1,973	1,109	1,18	1,74	0,287	4,691	2,50	1,76
8	1,972	1,106	1,13	1,47	0,286	4,672	2,14	1,34
9	1,969	1,101	0,97	1,01	0,285	4,651	1,79	0,89
10	1,959	1,085	0,46	0,46	0,284	4,639	1,43	0,63
	<i>Газосиликат</i>				<i>Войлок</i>			
1	1,570	3,557	8,28	7,14	0,537	5,095	7,47	6,15
2	1,551	3,523	6,89	6,11	0,532	5,060	6,47	5,42
3	1,532	3,501	5,52	5,45	0,524	4,989	4,87	3,94
4	1,513	3,460	4,34	4,22	0,523	4,944	4,63	3,01
5	1,500	3,432	3,45	3,37	0,482	4,925	3,67	2,61
6	1,495	3,425	2,76	3,16	0,516	4,895	3,26	1,98
7	1,487	3,418	2,76	2,95	0,516	4,874	3,28	1,54
8	1,482	3,407	2,07	2,44	0,511	4,860	2,25	1,25
9	1,477	3,387	1,86	2,02	0,508	4,850	1,67	1,04
10	1,465	3,352	1,03	0,96	0,493	4,768	1,40	0,67

используемого в качестве образцовой меры, $\lambda = 0,195$ Вт/(м·К), $\alpha = 1,09 \cdot 10^{-7}$ м²/с; рипора – $\lambda = 0,028$ Вт/(м·К), $\alpha = 4,61 \cdot 10^{-7}$ м²/с; газосиликата – $\lambda = 0,145$ Вт/(м·К), $\alpha = 3,32 \cdot 10^{-7}$ м²/с; войлока – $\lambda = 0,05$ Вт/(м·К), $\alpha = 4,8 \cdot 10^{-7}$ м²/с.

В результате анализа представленных данных (см. табл. 1) расчетно-экспериментальным методом установлено, что относительная погрешность измерения не более 5 % при определении λ и α получена при следующих $t_{\text{инт}}$, мин: для ПММ – 2; рипора и войлока – 3; газосиликата – 4. Полученные результаты свидетельствуют о повышении оперативности метода определения ТФС материалов и изделий ИИИС в 3 – 5 раз.

В итоге получены следующие результаты.

1. Разработан метод повышения оперативности контроля параметров ТФС теплоизоляционных материалов и изделий – коэффициентов тепло- и температуропроводности, в 3 – 5 раз в результате выбора разработанной ИИИС оптимального интервала между теплофизическими измерениями с адаптацией к исследуемому материалу или изделию по теплопроводности.

2. Создана ИИИС, реализующая метод повышения оперативности определения ТФС материалов и изделий с использованием разработанных модулей алгоритмического и программного обеспечения, базы знаний, блока управления теплофизическими измерениями и ЦИК.

3. Проведены экспериментальные исследования разработанной ИИИС и выполнен метрологический анализ результатов измерений, на основе которых установлено, что относительная погрешность определения параметров ТФС теплоизоляционных материалов не более 5 %.

Предложенный метод повышения оперативности определения параметров ТФС материалов и изделий с использованием информационно-измерительных систем рекомендуется применять при производстве и разработке новых теплоизоляционных материалов.

Список литературы

1. Теплофизические измерения и приборы / Е. С. Платунов [и др.]. – Л. : Машиностроение, 1986. – 256 с.

2. Maglic, D. K. Standartized Methods for the Measurement of Thermophysical Properties / D. K. Maglic // High. Pressures. – 1979. – Vol. 11, No. 11. – P. 1 – 8.

3. Belyaev, V. P. Determination of the Diffusion Coefficient in Nondestructive Testing of Thin Articles of Anisotropic Porous Materials / V. P. Belyaev, S. V. Mischenko, P. S. Belyaev // Measurement Techniques. – 2017. – Vol. 60, Issue 4. – P. 392 – 398.

4. Селиванова, З. М. Математические модели и алгоритм для совершенствования информационно-измерительной системы неразрушающего контроля теплофизических свойств материалов / З. М. Селиванова, Т. А. Хоан // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2016. – Т. 22, № 4. – С. 520 – 534.

5. Selivanova, Z. M. A Systematic Method of Improving the Accuracy of an Information and Measuring System for Determining the Thermophysical Properties of Materials Under the Effect of Destabilizing Factors / Z. M. Selivanova, T. A. Khoan // Measurement Techniques. – 2017. – Vol. 60, No. 5. – P. 473 – 480.

6. Стасенко, К. С. Интеллектуальная информационно-измерительная система мониторинга режимных параметров технологического процесса производства минераловатных плит / К. С. Стасенко, З. М. Селиванова // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2013. – Т. 19, № 1. – С. 52 – 60.

7. The Development of the Data Transfer Protocol in the Intelligent Control Systems of the Energy Carrier Parameters / I. S. Karavaev [et al.] // Conference Venue at the National Research University of Electronic Technology "MIET", Proceedings of the IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, ElConRus 2018, 29–31 January, 2018, Moscow. – 2018. – P. 1305 – 1309.

8. Глазкова, В. В. Оценка точности вычисления нижних граничных значений вероятностей состояний функционирования сложных систем / В. В. Глазкова, Д. Ю. Муромцев, В. Н. Шамкин // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2016. – Т. 22, № 3. – С. 340 – 349.

Improving the Efficiency of Control of Thermophysical Properties of Thermal Insulating Materials of Intellectual Information-Measuring System

Z. M. Selivanova¹, D. S. Kurenkov¹, V. F. Kalinin², I. I. Pasechnikov³

*Department of Designing Radioelectronic and Microprocessor Systems (1),
Power Engineering (2), TSTU, Tambov, Russia; selivanova@mail.jesby.tstu.ru;
Department of Theoretical and Experimental Physics (3),
G. R. Derzhavin TSU, Tambov, Russia*

Keywords: pulsed thermal effect; intelligent information measuring system; speed control; thermophysical properties of materials.

Abstract: The paper describes a method developed to increase the efficiency of control over thermophysical properties of thermal insulation materials. When conducting thermophysical measurements, the proposed intelligent information-measuring system selects the optimal intervals between thermal measurements using the created algorithmic and software modules, depending on the measurement situation, previously determined from a test thermogram. This allows increasing the efficiency of determining the coefficients of heat and temperature conductivity by 3–5 times with a relative error of not more than 5 %.

References

1. Platunov Ye.S., Buravov S.Ye., Kurepin V.V., Petrov G.S. *Teplofizicheskiye izmereniya i pribory* [Thermophysical Measurements and Instruments], Leningrad: Mashinostroyeniye, 1986, 256 p. (In Russ.)
2. Maglic D.K. Standartizet Methods for the Measurement of Thermophysical Properties, *High. Pressures*, 1979, vol. 11, no. 11, pp. 1-8.
3. Belyaev V.P., Mischenko S.V., Belyaev P.S. Determination of the Diffusion Coefficient in Nondestructive Testing of Thin Articles of Anisotropic Porous Materials, *Measurement Techniques*, 2017, vol. 60, issue 4, pp. 392-398. (In Eng.)
4. Selivanova Z.M., Khoan T.A. [Mathematical Models and Algorithm for Improving the Information-measuring System for Nondestructive Testing of Thermal-Physical Properties of Materials], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2016, vol. 22, no. 4, pp. 520-534. (In Russ., abstract in Eng.)
5. Selivanova Z. M., Khoan T.A. A Systematic Method of Improving the Accuracy of an Information and Measuring System for Determining the Thermophysical Properties of Materials Under the Effect of Destabilizing Factors, *Measurement Techniques*, 2017, vol. 60, no. 5, pp. 473-480. (In Eng., abstract in Russ.)
6. Stasenko K.S., Selivanova Z.M. [Intelligent Information-measuring System for Monitoring the Regime Parameters of the Technological Process for the Production of Mineral Wool Slabs], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2013, vol. 19, no. 1, pp. 52-60. (In Russ., abstract in Eng.)
7. Karavaev I.S., Selivantsev V.I., Shtern Y.I., Shtern M.Y. The Development of the Data Transfer Protocol in the Intelligent Control Systems of the Energy Carrier Parameters, *Conference venue at the National Research University of Electronic Technology "MIET", Proceedings of the IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, ElConRus 2018*, 29-31 January, 2018, Moscow, pp. 1305-1309. (In Eng.)

8. Glazkova V.V., Muromtsev D.Yu., Shamkin V.N. [Estimation of the Accuracy of Calculating the Lower Boundary Values of the Probabilities of States of Functioning of Complex Systems], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2016, vol. 22, no. 3, pp. 340-349. (In Russ., abstract in Eng.)

Verbesserung der Geschwindigkeit der Kontrolle der thermophysikalischen Eigenschaften von Wärmedämmstoffen durch das intellektuelle Informations- und Messsystem

Zusammenfassung: Es ist eine Methode zur Erhöhung der Kontrolle der thermophysikalischen Eigenschaften von Wärmedämmstoffen entwickelt, die darin besteht, dass bei der Durchführung von thermophysikalischen Messungen das vorgeschlagene intellektuelle Informations- und Messsystem mit den erstellten algorithmischen und Softwaremodulen die optimalen Intervalle zwischen den thermophysikalischen Messungen in Abhängigkeit von der Messsituation auswählt, die nach dem Testthermogramm vordefiniert ist. So kann die Effizienz der Bestimmung der thermischen und physikalischen Eigenschaften von Wärmedämmstoffen in 3 – 5-mal mit einem relativen Fehler von nicht mehr als 5% erhöht werden.

Augmentation de l'efficacité du contrôle des propriétés thermophysiques des matériaux d'isolation thermique par un système intelligent d'information et de mesure

Résumé: A été mise au point une méthode pour l'augmentation de l'efficacité du contrôle des propriétés thermophysiques des matériaux d'isolation thermique: lors de la réalisation des mesures thermophysiques, le système intelligent d'information et de mesure en utilisant les modules algorithmiques et logiciels créés sélectionne les intervalles optimaux entre les mesures thermophysiques en fonction de la situation de mesure prédéfinie par le thermogramme de test, ce qui permet d'augmenter la rapidité de la détermination des coefficients de conductivité thermique de 3 à 5 fois avec une erreur relative de pas plus de 5 %.

Авторы: *Селиванова Зоя Михайловна* – доктор технических наук, профессор кафедры «Конструирование радиоэлектронных и микропроцессорных систем»; *Куренков Дмитрий Сергеевич* – магистрант; *Калинин Вячеслав Федорович* – доктор технических наук, профессор кафедры «Электроэнергетика», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия; *Пасечников Иван Иванович* – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой теоретической и экспериментальной физики, ФГБОУ ВО «ТГУ имени Г. Р. Державина», г. Тамбов, Россия.

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