

**ПРОЕКТИРОВАНИЕ ОПТИМАЛЬНОГО РЕЖИМА
ПРОВЕДЕНИЯ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО ТЕПЛООВОГО КОНТРОЛЯ
МАЛОГАБАРИТНЫХ ИЗДЕЛИЙ**

А. А. Чуриков, Н. А. Коньшева, Г. В. Шишкина

*Кафедра «Мехатроника и технологические измерения»,
ФГБОУ ВПО «ТГТУ»; alex@chur.tstu.ru;*

Ключевые слова: автоматизированный выбор оптимального режима теплового контроля; керамические и твердые неоднородные материалы; малогабаритные изделия; малый температурный и временной интервалы измерения; неразрушающий контроль; температуропроводность; теплопроводность; управление параметрами процесса измерения теплофизических свойств.

Аннотация: При массовых исследованиях теплофизических свойств теплоизоляционных материалов большого класса новых высокотеплопроводных электроизоляционных (например, керамических) изделий или их элементов различной формы чаще всего требуется исследовать их в широком диапазоне изменения температуры, но при этом решающим требованием к методу измерения является кратковременность проведения нагрева и измерения тепловых параметров – неразрушающий контроль температурозависимых теплофизических свойств материала исследуемых образцов или готовых изделий. Быстрый теплофизический контроль свойств в лабораторных условиях значительно сокращает время разработки и корректировки технологии изготовления данных материалов. Предложен комплексный метод оценки температурозависимых теплофизических свойств малых изделий из неоднородных материалов различной консистенции: от твердых до пластичных. Используя решение двумерной обратной задачи теплопроводности, получим расчетные зависимости для временной интегральной характеристики температуры или теплового потока и поверхностно-временной интегральной характеристики для этих же параметров теплового процесса, которые позволят разработать методику поиска и коррекции параметров эксперимента (тепловых, временных, геометрических) и вычислительных процедур, обеспечивающих максимально возможную для данного изделия точность проведения измерения.

Оценка состояния и характеристик материалов и конструкций с помощью методов неразрушающего контроля (НК) является приоритетной потребностью во всем мире. Неразрушающий контроль теплофизических свойств продукции с небольшими плоскими участками поверхности необходимо проводить, в первую очередь, для выявления дефектов данных материалов.

Одним из основных условий повышения эффективности и качества сложных теплофизических экспериментально-расчетных исследований является их планирование, под которым понимают выбор основных факторов эксперимента в зависимости от вида и числа искомых параметров и заданной точности их определения [1]. Поиск оптимальных режимных и конструктивных параметров НК теплофизических свойств (**ТФС**) малогабаритных изделий из керамических твердых материалов [2] направлен, в первую очередь, на то чтобы обеспечить адекватность идеализированной математической модели метода реальному тепловому процессу, что дает возможность определять ТФС с минимальной методической погрешностью [3, 4].

Разработанный [1, 3] относительный метод НК комплекса ТФС (теплопроводности λ и температуропроводности a) основан на дискретном тепловом воздействии, где удельная тепловая мощность источника тепла

$$Q_d(t) = \begin{cases} Q_d = \text{const} & \text{при } t \leq t_d, \\ 0 & \text{при } t > t_d \end{cases} \quad [2].$$

Математическая модель данного метода предполагает наличие двух соприкасающихся полуограниченных тел – исследуемого ($0 \leq r < +\infty, 0 \leq z < +\infty$) и сравнимого ($0 \leq r < +\infty, -\infty < z \leq 0$), между которыми в плоскости $z=0$ действует круглый источник тепла радиусом R_1 . Краевая задача теплопроводности (**КЗТ**) решена с применением интегрального преобразования Лапласа температуры и теплового потока по времени t и интегрального преобразования Ханкеля этих величин с бесконечным пределом по координате r . Основным информационным параметром метода является поверхностно-временная интегральная характеристика (**ПВИХ**) температуры [1] нагреваемого участка тела (круга) поверхности $z=0$ вида

$$S^*(p) = \int_0^{\infty} e^{-pt} S(t) dt, \quad (1)$$

где $S(t) = \frac{2}{R_1^2} \int_0^{R_1} U(r,0,t) r dr$ – поверхностная интегральная характеристика (**ПИХ**) температуры [1], измеряемая с помощью поверхностных интегрирующих преобразователей температуры [3]; $U(r,0,t)$ – избыточная, относительно начальной, температура поверхности $z=0$ исследуемого тела; $p > 0$ – параметр интегрального преобразования Лапласа.

При выводе расчетных формул используется аналог критерия Фурье – безразмерный параметр $g = \frac{pR_1^2}{a}$, уравнение НК которого для двух различных значений параметра интегрирования p и kp , ($k > 1$) имеет следующий вид [3]:

$$\Theta \equiv \frac{Q_d/kp S^*(kp) - \lambda_3/2R_1 W(kg_3, k\tau)}{Q_d/p S^*(p) - \lambda_3/2R_1 W(g_3, \tau)} = \frac{W(g, \tau)}{W(kg, k\tau)} \equiv \Phi(g, \tau, k), \quad (2)$$

где $g_3 = \frac{pR_1^2}{a_3}$; a_3 и λ_3 – температуропроводность и теплопроводность эталонного тела (известные и постоянные во время эксперимента величины);

$$W(g, \tau) = (1 - e^{-\tau})V(g); \quad V(g) = \int_0^{\infty} \frac{J_1^2(\mu) d\mu}{\sqrt{\mu^2 + g\mu}}, \quad V(g_3) = \int_0^{\infty} \frac{J_1^2(\mu) d\mu}{\sqrt{\mu^2 + g_3\mu}} - \text{функция для}$$

исследуемого и эталонного образцов соответственно; J_1 – функции Бесселя первого рода первого порядка; $\tau = pt_d$; t_d – время действия источника тепла.

Левая часть уравнения (2) определяется расчетным путем на основании данных, полученных из результатов экспериментальных измерений, и известных до начала эксперимента величин $(R_1, \lambda_3, g_3, k, \tau)$. Правая часть – не зависит от экспериментальных данных, $\Phi(g, \tau, k)$ – неявно выраженная аналитическая функция параметра g , значение которого находится для заданных фиксированных k, τ по экспериментально определенному значению Θ . С учетом найденного из уравнения (2) g , величины температуропроводности и теплопроводности вычисляются по соответствующим формулам

$$a = \frac{pR_1^2}{g}; \quad (3)$$

$$\lambda = 2R_1 \left(\frac{Q_d}{pS^*(p)} - \frac{\lambda_3}{2R_1 W(g_3, \tau)} \right) W(g, \tau). \quad (4)$$

Метрологический анализ расчетных зависимостей НК ТФС (2) – (4) показал, что относительная погрешность определения теплопроводности $\delta\lambda$ всегда меньше, чем относительная погрешность определения температуропроводности, поэтому в качестве критерия для определения оптимальных параметров эксперимента выбрана относительная погрешность δa . Однако для температуропроводности нет четкой, явно выраженной аналитической формулы численного расчета по экспериментальным данным и ее значение находится из уравнения, где она неявно выражена. Применив отдельно к левой и правой частям выражения (2) известный подход последовательного логарифмирования и дифференцирования [5], найдем целевую функцию

$$\eta(g, \tau, k) = \frac{\sqrt{W^2(kg, k\tau) + W^2(g, \tau)}}{\left[W'_g(g, \tau)W(kg, k\tau) - W'_g(kg, k\tau)W(g, \tau) \right] g}, \quad (5)$$

минимизируя которую по переменным g, τ и k

$$\min_{0 < g < \infty, \tau > 0, k > 1} \eta(g, \tau, k) = \frac{\sqrt{W^2(k_{\text{опт}}g_{\text{опт}}, \tau_{\text{опт}}) + W^2(g_{\text{опт}}, \tau_{\text{опт}})}}{\left[W'_g(g_{\text{опт}}, \tau_{\text{опт}})W(k_{\text{опт}}g_{\text{опт}}, \tau_{\text{опт}}) - W'_g(k_{\text{опт}}g_{\text{опт}}, \tau_{\text{опт}})W(g_{\text{опт}}, \tau_{\text{опт}}) \right] g_{\text{опт}}}, \quad (6)$$

можно обеспечить минимум погрешности δa и выбрать соответствующие этому минимуму оптимальные значения варьируемых параметров $g_{\text{опт}}, \tau_{\text{опт}}, k_{\text{опт}}$, определяющих временные и геометрические характеристики эксперимента.

На рисунке 1 показаны графики функции $\eta(g, \tau, k)$, из которых видно, что для каждого целого k функция $\eta(g, \tau, k)$ принимает минимум $\eta_{\min} = \eta(g_{\text{опт}}, \tau, k_{\text{опт}})$ в определенном интервале $g \in [0, 2 \dots 0, 6]$. Для выбора конкретного значения параметра $g_{\text{опт}}$ из данного диапазона проведен анализ адекватности аналитической модели для системы полуограниченных тел действительному процессу, происходящему в реальных изделиях различных форм и весьма малых геометрических размеров. Была найдена целевая функция, которую необходимо минимизировать [6]

$$\Delta V(g_3, g, m) = |V_1(g_3, m) - V(g)|, \quad (7)$$

где $m = \frac{R_2}{R_1}$ – безразмерный параметр, определяющий соотношение радиуса нагревателя R_1 и радиуса измерительного зонда (сравниваемого тела) R_2 ;

$$V_1(g_3, m) = \frac{2}{m^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{J_1(\mu_n)}{J_1^2(\mu_n m) \mu_n^2 \sqrt{\mu_n^2 + g_3}} - \text{функция, полученная при решении ана-}$$

логичной КЗТ, но с использованием интегрального преобразования Ханкеля с конечным пределом по координате r ($0 \leq r \leq R_2$).

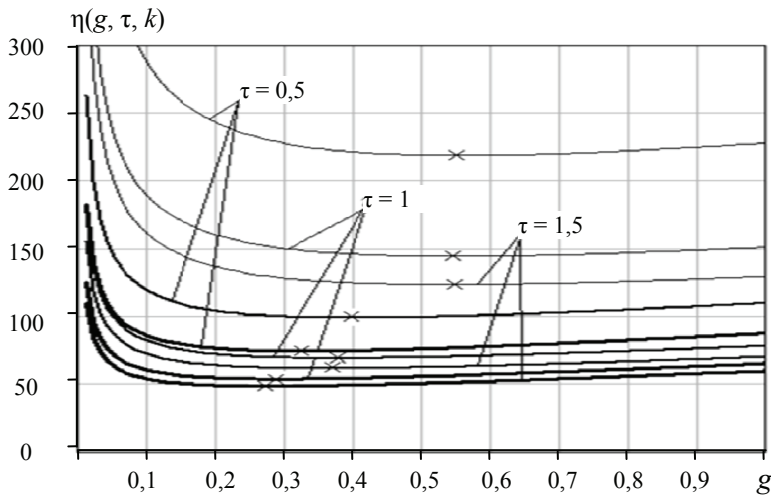


Рис. 1. Зависимость функции $\eta(g, \tau, k)$ от параметра g при различных τ и k :

— $k = 6$; — $k = 4$; — $k = 2$; \times — η_{\min}

В рассматриваемом методе используются интеграторы температуры, позволяющие получать информацию о температуре всего нагреваемого участка тела (круга радиусом R_1). Так как экспериментам подвергаются малые образцы (зонд устанавливается на плоский участок поверхности), выберем из всех возможных целых значений параметра m наименьшее $m_{\text{опт}} = 2$, такое соотношение радиусов, при котором информация будет наиболее представительной без нарушения условий полуограниченности образца и измерительного зонда. Для $m_{\text{опт}} = 2$ одна из составляющих методической погрешности

$$\delta(m_{\text{опт}}, g_{\text{опт}}) = \frac{|V_1(g_{\text{опт}}, m_{\text{опт}}) - V(g_{\text{опт}})|}{V(g_{\text{опт}})}$$

не превышает 0,1 % при $g_{\text{опт}} = 0,55$.

Вернемся к рассмотрению зависимости (6). Для принятого $g_{\text{опт}} = 0,55$ ближайший минимум η_{\min} достигается при значении $k_{\text{опт}} = 2$, причем параметр τ практически не влияет на смещение минимума η_{\min} относительно g (см. рис. 1), но, как показали численные расчеты, для того чтобы функция $\Phi(g, k, \tau)$, обладала чувствительностью к изменению τ , необходимо обеспечить в эксперименте выполнение неравенства $0 < \tau \ll 5$.

Для материала с температуропроводностью a и заданным радиусом R_1 существует оптимальное значение параметра p , а именно $p_{\text{опт}} = g_{\text{опт}} a / R_1^2$. Теоретически параметр интегрального преобразования Лапласа произволен, что говорит о некоторой некорректности метода, поэтому возникает задача нахождения значения p – такого, которое обеспечит наилучшее определение ТФС. Рассмотрим характер поведения функции $S(t)$ при дискретном тепловом воздействии. В работе [7] указано, что результат действия прямоугольного импульса рассчитывается путем добавления к кривой постоянного нагрева, начиная с момента $t = 0$ при мощности источника Q_d , кривой постоянного охлаждения, начиная с $t = t_d$ при той же мощности. В случае нулевого начального распределения температуры в исследуемом образце ПИХ при распространении тепла от плоского круглого нагревателя постоянной во время эксперимента мощности имеет вид [8]

$$S_{\text{непр}}(t) = \frac{2q}{\lambda} \int_0^{\infty} J_1^2(R_1 \xi) \frac{\text{erf}(\xi \sqrt{at})}{\xi^2} d\xi, \quad (8)$$

чему в пространстве изображений соответствует [1]

$$S_{\text{непр}}^*(p) = \frac{2q}{p\lambda} \int_0^\infty \frac{J_1(\xi R_1)}{\xi \sqrt{\xi^2 + p/a}} d\xi.$$

В случае дискретного теплового потока

$$q_d(t) = \begin{cases} q_d & \text{при } t \leq t_d, \\ 0 & \text{при } t > t_d \end{cases}$$

ПВИХ температуры нагреваемого круга поверхности $z = 0$ имеет вид [2]

$$S^*(p) = \frac{2q_d(1 - e^{-pt_d})}{p\lambda} \int_0^\infty \frac{J_1(\xi R_1)}{\xi \sqrt{\xi^2 + p/a}} d\xi = S_{\text{непр}}^*(p) - e^{-pt_d} S_{\text{непр}}^*(p). \quad (9)$$

С учетом теоремы запаздывания, выражению (9) в области оригинала будет соответствовать функция

$$S(t) = S_{\text{непр}}(t) - S_{\text{непр}}(t - t_d). \quad (10)$$

На рисунке 2 показан график $S(t)$, смоделированный с помощью зависимостей (8) и (10), без учета тепловой инерции. Как видно из графической иллюстрации, при $t \rightarrow \infty$ и $S \rightarrow (t)$. Обозначим момент времени t_k , начиная с которого $S(t)$ можно с определенной допустимой погрешностью Δ_S считать равной нулю. Для наиболее точного определения ТФС необходимо, чтобы при расчете ПВИХ температуры вида (1) учитывалась вся измеренная информация о $S(t)$ до $t = t_k$. Из рис. 2 видно, что подынтегральная функция $h(t) = S(t)e^{-pt} \rightarrow 0$ при $t \rightarrow \infty$, причем величина p определяет скорость убывания, и, следовательно, косвенно – длительность измерения экспериментальной информации. Тогда в момент времени t_k функция $h(t)$ не должна быть меньше (больше) некоторой заранее заданной малой величины ε_{\min} , обусловленной возможностями вычислительных средств. Исходя из последнего условия, найдем такое $p_{\text{опт}}$, при котором $h(t_k) = \varepsilon_{\min}$

$$S(t_k)e^{-p_{\text{опт}}t_k} = \varepsilon_{\min},$$

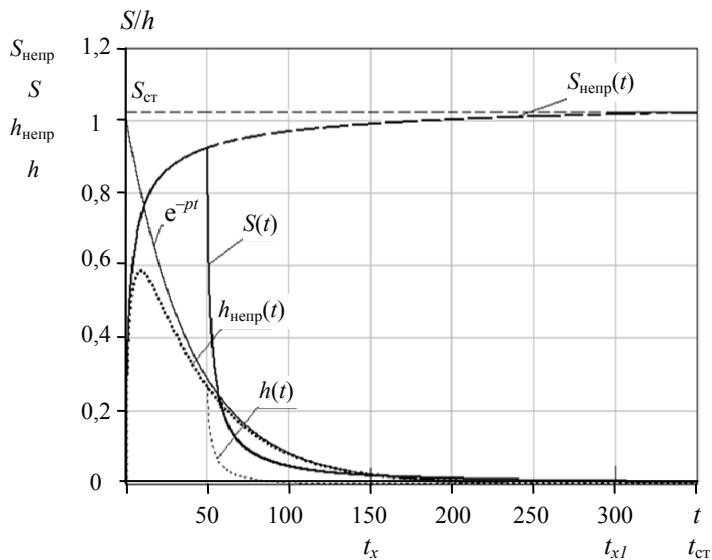


Рис. 2. Вид функций $S_{\text{непр}}(t)$, $S(t)$, $h_{\text{непр}}(t)$, $h(t)$, при $q_d = 600 \text{ Вт/м}^2$, $R_1 = 0,002 \text{ м}$, $a = 4 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$, $\lambda = 0,94 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$, $p = 0,025 \text{ с}^{-1}$

откуда

$$p_{\text{опт}} = -\frac{\ln(\varepsilon_{\text{мин}}/S(t_k))}{t_k}. \quad (11)$$

Однако, при некоторых искомым значениях a и λ измеряемая во время эксперимента $S(t)$ будет достигать значения Δ_S в разные моменты времени в зависимости от величины t_d (времени действия источника тепла), т.е. момент времени t_k определяется величиной t_d . Задавая различные значения t_d и проводя измерения $S(t)$ при прочих равных условиях эксперимента, можно подобрать опытным путем такое $t_{d,\text{опт}}$, при котором для материала с некоторыми величинами a и λ найденное $p_{\text{опт}}$ из экспериментальных данных по формуле (11) даст из уравнения НК (2) $g_{\text{изм}} = g_{\text{опт}} = 0,55$.

При найденных из экспериментов $p_{\text{опт}}$, $\tau_{\text{опт}} = p_{\text{опт}}$, $t_{d,\text{опт}} \ll 5$, и известных $g_{\text{опт}} = 0,55$, $k_{\text{опт}} = 2$ величины a и λ будут определяться по соответствующим формулам (3), (4) с наименьшей методической погрешностью.

В заключение отметим, что математические модели существующих методов [1, 9] предполагают тепловое воздействие, осуществляемое непрерывным во время эксперимента тепловым потоком. В этом случае температура в исследуемом образце $S_{\text{непр}}(t)$ при $t_{\text{ст}} \gg 0$ достигает стационарного значения $S_{\text{ст}}$ (см. рис. 2). Применение квадратурных формул Чебышева–Лагерра позволяет находить значение ПВИХ $S_{\text{непр}}^*(p)$ с весьма высокой точностью по информации о температуре за временной интервал $[0; t_{k1}]$ ($t_{k1} \cong 300$ с), в течение которого должен непрерывно действовать источник тепла. Время достаточно длительное и, во-первых, способствует распространению тепла, а соответственно и температурного поля, что может привести к нарушению условия полуограниченности по координатам r и z , вызывает необходимость исследовать образцы значительных геометрических размеров и не позволяет проводить измерения на малых образцах. Во-вторых, из сравнения графиков подынтегральных функции $h(t)$ и $h_{\text{непр}}(t) = S_{\text{непр}}(t)e^{-pt}$ видно, что функция $h(t)$ намного быстрее стремится к нулю, чем $h_{\text{непр}}(t)$, следовательно, для нахождения с достаточно высокой точностью значения ПВИХ $S^*(p)$ требуется информация о температуре исследуемого тела $S(t)$ за более короткий временной интервал $[0; t_k]$, $t_k \ll t_{k1}$. Таким образом, предлагаемый процесс организации нагрева позволяет значительно сократить длительность рабочей стадии эксперимента при повышении точности метода.

Список литературы

1. Чуриков, А. А. Методы и средства неразрушающего контроля теплофизических свойств изделий и образцов из неоднородных твердых материалов : дис. ... д-ра. техн. наук : 05.11.13 / Чуриков Александр Алексеевич. – Тамбов, 2000. – 650 с.
2. Антонова, Л. Л. Теплофизический контроль качества керамических элементов радиотехнического и электротехнического назначения / Л. Л. Антонова, А. А. Чуриков // Состояние и проблемы измерений: сб. 9-й Всерос. науч.-техн. конф. – М., 2004. – С. 175 – 176.
3. Антонова, Л. Л. Метод неразрушающего теплофизического контроля образцов малых геометрических размеров из твердых материалов / Л. Л. Антонова, А. А. Чуриков // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2005. – Т. 11, № 3. – С. 618 – 624.
4. Чуриков, А. А. Методика определения геометрических и временных параметров неразрушающего контроля комплекса теплофизических свойств / А. А. Чуриков, Л. Л. Антонова // Контроль. Диагностика. – 2006. – № 11. – С. 36 – 45.

5. Осипова, В. И. Экспериментальные исследования процессов теплообмена / В. И. Осипова. – М. : Энергия, 1979. – 243 с.

6. Коньшева, Н. А. Поиск оптимальных параметров теплового неразрушающего контроля твердых ортотропных материалов / Н. А. Коньшева, А. А. Чуриков, Г. В. Шишкина // Контроль. Диагностика. – 2010. – № 7 (145). – С. 21 – 29.

7. Камья, Ф. М. Импульсная теория теплопроводности : пер. с фр. / Ф. М. Камья. – М. : Энергия, 1972. – 272 с.

8. Карслоу, Г. Теплопроводность твердых тел : пер. с англ. / Г. Карслоу, Д. Егер. – М. : Наука, 1964. – 487 с.

9. Буренина, Н. А. Интегральные преобразования и измерительные устройства в теплофизическом неразрушающем контроле ортотропных материалов / А. А. Буренина, А. А. Чуриков /// Труды ТГТУ : сб. науч. ст. молодых ученых и студентов / Тамб. гос. техн. ун-т. – Тамбов, 1999. – Вып. 4. – С. 44 – 46.

Designing the Optimal Mode of Non-Destructive Testing of Small-Sized Products

A. A. Churikov, N. A. Konysheva, G. V. Shishkina

*Department of Mechatronics and Measurement Technology, TSTU;
alex@chur.tstu.ru*

Keywords: automatic selection of thermal control optimum mode; ceramic and solid heterogeneous materials; low temperature and measurement time intervals; non-destructive testing; parameter control of thermal properties during measurement process; small-sized products; thermal conductivity; thermal diffusivity.

Abstract: The study of thermal properties of insulation materials of new highly thermally conductive insulating products (e.g., ceramic) or components of various shapes requires testing in a wide range of temperatures. However, the decisive requirement to the measurement method is a short duration of heating and measurement of thermal parameters, i.e. non-destructive testing of temperature-dependent thermal properties of materials of samples or finished products. Rapid thermal control of properties in laboratory conditions significantly reduces the time for developing and adjusting the manufacturing technology of these materials. We propose a comprehensive method for measuring temperature-dependent thermal properties of small products made from heterogeneous materials of various consistency, from solids to plastics. Using the solution of the two-dimensional inverse heat conduction problem, we obtained calculated dependences for a temporal integral characteristic of temperature or heat flow and a surface-temporal integral characteristic for the same parameters of the thermal process. This will enable to develop a methodology of search and correction of experimental parameters (temperature, time, geometry) and computational procedures, ensuring the maximum possible accuracy of measurement for this product.

References

1. Churikov A.A. *Doctor's thesis*, Tambov, 2000, 650 p. (In Russ.)
2. Antonova L.L., Churikov A.A. [Thermophysical quality control of ceramic elements of radio engineering and electrical purposes], *Sostoyanie i problemy izmerenii:*

sbornik 9-i Vseros. nauch.-tekh. Konf [Status and measurement problems: a collection of the 9th All-Russia Scientific and Technical Conference], Moscow, 2004, pp. 175-176. (In Russ.)

3. Antonova L.L., Churikov A.A. [The method of non-destructive thermal control samples of small geometric dimensions of solid materials], *Transactions of Tambov State Technical University*, 2005, vol. 11, no. 3, pp. 618-624. (In Russ., abstract in Eng.)

4. Churikov A.A., Antonova L.L. [Methods to determine geometric and time parameters of non-destructive testing of the complex thermal properties], *Kontrol'. Diagnostika* [Kontrol'. Diagnostika], Moscow: Mashinostroenie, 2006, no. 11, pp. 36-45. (In Russ.)

5. Osipova V.I. *Ekspperimental'nye issledovaniya protsessov teploobmena* [Experimental study of heat transfer processes], Moscow: Energiya, 1979, 243 p. (In Russ.)

6. Konysheva N.A., Churikov A.A., Shishkina G.V. [Search of Optimum Parameters for Thermal Non-Destructive Testing of Hard Orthotropic Materials], *Kontrol'. Diagnostika* [Kontrol'. Diagnostika], 2010, no. 7 (145), pp. 21-29. (In Russ., abstract in Eng.)

7. Kamyra F.M. *Impul'snaya teoriya teploprovodnosti* [Pulse thermal conductivity theory], Moscow: Energiya, 1972, 272 p. (In Russ.)

8. Carslaw H.S., Jaeger J.C. *Conduction of Heat in Solids*, Oxford: Clarendon Press, 1959.

9. Burenina N.A., Churikov A.A. [Integral transforms and measuring devices in the thermophysical nondestructive testing of orthotropic materials], *Trudy TGTU* [Transactions of the TSTU], Collection of scientific papers of young scientists and students, Tambov, 1999, issue 4, pp. 44-46. (In Russ.)

Projektierung des optimalen Regimes der Durchführung der nichtzerstörenden thermischen Kontrolle der Kleinerzeugnisse

Zusammenfassung: Bei den Massenforschungen der wärmephysikalischen Eigenschaften der wärmeisolierenden Materialien der großen Klasse der neuen wärmeleitenden (zum Beispiel, keramischen) Erzeugnisse oder ihrer Elemente der verschiedenen Formen meistens erforderlich ist, sie im breiten Umfang der Veränderung der Temperatur zu untersuchen. Aber dabei ist die entscheidende Forderung zur Methode der Messung der kurzen Dauer der Durchführung der Erwärmung und der Messung der thermischen Parameter – die nichtzerstörende Kontrolle wärmeabhängigen wärmephysikalischen Eigenschaften des Materials der untersuchten Muster oder der Fertigwaren nötig. Die schnelle wärmephysikalische Kontrolle der Eigenschaften in den labormässigen Bedingungen verkürzt wesentlich die Zeit der Entwicklung und der Korrektur der Technologie der Herstellung dieser Stoffen. Es ist die Komplexmethode der Einschätzung der wärmeabhängigen wärmephysikalischen Eigenschaften der kleinen Erzeugnisse aus den ungleichartigen Materialien der verschiedenen Konsistenz: von den Festen bis zu Plastischen vorgeschlagen. Die Lösung der zweidimensionalen rückgängigen Wärmeübergang verwendend, erhalten wir die Rechenabhängigkeiten für die Zeitintegralcharakteristik der Temperatur oder des thermischen Stroms und der oberflächlichen vorübergehenden Integralcharakteristik für diese Parameter des thermischen Prozesses. Sie lassen zu, die

Methodik der Suche und der Korrektur der Parameter des Experimentes (thermischen, zeitlichen, geometrischen) und der Rechenprozeduren zu entwickeln, die für die gegebenen Erzeugnisse die minimal mögliche Genauigkeit der Durchführung der Messung gewährleisten.

Conception du régime optimale du contrôle thermique non destructif des produits de petits gabarits

Résumé: Lors des études des propriétés thermiques des matériaux d'isolation thermique d'une grande classe de nouveaux produits de haute isolation électrique (par exemple, céramiques) ou bien de leurs éléments de différentes formes, le plus souvent il est nécessaire de les étudier dans une large gamme de variations de température mais avec la courte durée de l'échauffement et de la mesure des paramètres thermiques. Le contrôle rapide thermophysique des propriétés dans les conditions de laboratoire réduit considérablement le temps du traitement et de l'ajustement de la technologie de la fabrication des matériaux. Est proposée une méthode complexe d'évaluation des propriétés thermiques dépendant de la température des petits produits de la consistance différente: solide et plastique. La méthodologie permet de rechercher et de coordonner des paramètres de l'expérience (thermiques, temporaires, géométriques) ainsi que d'effectuer des procédures de calcul.

Авторы: *Чуриков Александр Алексеевич* – доктор технических наук, профессор кафедры «Мехатроника и технологические измерения»; *Коньшева Наталья Александровна* – кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры «Мехатроника и технологические измерения»; *Шишкина Галина Викторовна* – кандидат технических наук, доцент кафедры «Мехатроника и технологические измерения», ФГБОУ ВПО «ТГТУ».

Рецензент: *Чернышов Владимир Николаевич* – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Уголовное право и прикладная информатика в юриспруденции», ФГБОУ ВПО «ТГТУ».