

Раздел II

**МЕТОДЫ И СРЕДСТВА КОНТРОЛЯ
ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ, ВЕЩЕСТВ,
МАТЕРИАЛОВ И ИЗДЕЛИЙ**

**II. METHODS AND MEANS OF CONTROL
OVER ENVIRONMENT, SUBSTANCES,
MATERIALS AND PRODUCTS**

УДК 536.24

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ОПТИМАЛЬНОГО РЕЖИМА ПРОВЕДЕНИЯ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ

Л.Л. Антонова, А.А. Чуриков

Кафедра «Автоматизированные системы и приборы», ТГТУ

Ключевые слова и фразы: временные параметры; геометрические параметры; интегральные характеристики; малые образцы; неразрушающий контроль; преобразование Лапласа; теплофизические свойства.

Аннотация: Описан метод неразрушающего контроля комплекса теплофизических свойств, основанный на дискретном тепловом воздействии через круглый участок поверхности; предложена методика нахождения геометрических и временных параметров измерительных процедур, обеспечивающих определение теплофизических свойств с необходимой точностью.

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 количества искомых параметров метода контроля и заданной точности их определения [1]. Поиск оптимальных режимных и конструктивных параметров неразрушающего контроля (НК) теплофизических свойств (ТФС) твердых материалов 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.

Разработанный нами относительный метод НК комплекса ТФС (теплопроводности λ и температуропроводности a основан на дискретном во времени тепловом воздействии: удельная мощность источника тепла

$Q_d(t) = \begin{cases} Q_d = \text{const} & \text{при } t \leq t_d \\ 0 & \text{при } t > t_d \end{cases}$ [2]. Математическая модель данного метода пред-

полагает наличие двух соприкасающихся полуограниченных тел - исследуемого ($0 \leq r < +\infty$, $0 \leq z < +\infty$) и сравниваемого ($0 \leq r < +\infty$, $-\infty < z \leq 0$), между которыми в плоскости $z = 0$ действует круглый источник тепла радиусом R и мощностью $Q_d(t)$. Краевая задача теплопроводности (**КЗТ**) была решена с применением интегрального преобразования Лапласа температуры и теплового потока по времени t и интегрального преобразования Ханкеля с бесконечным пределом этих величин по координате r . Основным информационным параметром метода является поверхностно-временная интегральная характеристика (**ПВИХ**) температуры нагреваемого участка тела (в нашем случае круга) поверхности $z = 0$ вида

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

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

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

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

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

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

первого порядка; $\tau = pt_d$; t_d – время действия источника тепла.

Левая часть уравнения (2) (величина Θ) определяется расчетным путем на основании данных, полученных из результатов экспериментальных измерений, и известных до начала эксперимента величин $(R, \lambda_{\text{э}}, g_{\text{э}}, k, \tau)$. Правая часть – не зависит от экспериментальных данных, $\Phi(g, \tau, k)$ – 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:

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

$$\lambda = 2R \left(\frac{Q_d}{pS^*(p)} - \frac{\lambda_{\text{э}}}{2RW(g_{\text{э}}, \tau)} \right) W(g, \tau). \quad (4)$$

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, обеспечивающих минимум погрешности, выбрана относительная погрешность δa . Однако, для температуропроводности нет четкой, явно выраженной аналитической формулы численного расчета по экспериментальным данным. Применив отдельно к левой и правой части выражения (2) известный подход последовательного логарифмирования и дифференцирования [3], мы нашли целевую функцию

$$\eta(g, \tau, k) = \frac{\sqrt{W^2(kg, k\tau) + W^2(g, \tau)}}{\left[W'_g(g, \tau)W(kg, k\tau) - W'_g(kg, k\tau)W(g, \tau) \right]} \cdot \frac{1}{g}, \quad (5)$$

минимизируя которую по переменным g , τ и k , можно обеспечить минимум погрешности δa и выбрать соответствующие этому минимуму оптимальные значения варьируемых параметров $g_{\text{опт}}$, $\tau_{\text{опт}}$, $k_{\text{опт}}$, определяющих конкретные временные и геометрические характеристики эксперимента.

На рис. 1 показаны графики функции $\eta(g, \tau, k)$, из которого 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 диапазона $[0, 2 \dots 0, 6]$ проведен анализ адекватности аналитической модели из системы полуограниченных тел действительному процессу, происходящему в реальных изделиях различных форм и весьма малых геометрических размеров. Была аналитически найдена формула для оценки погрешности, вносимой конечными боковыми размерами ($0 \leq r \leq R_3$), [4]

$$\delta_{\text{КБР}}(g, m) = \frac{|V_1(g, m) - V(g)|}{V(g)}, \quad (6)$$

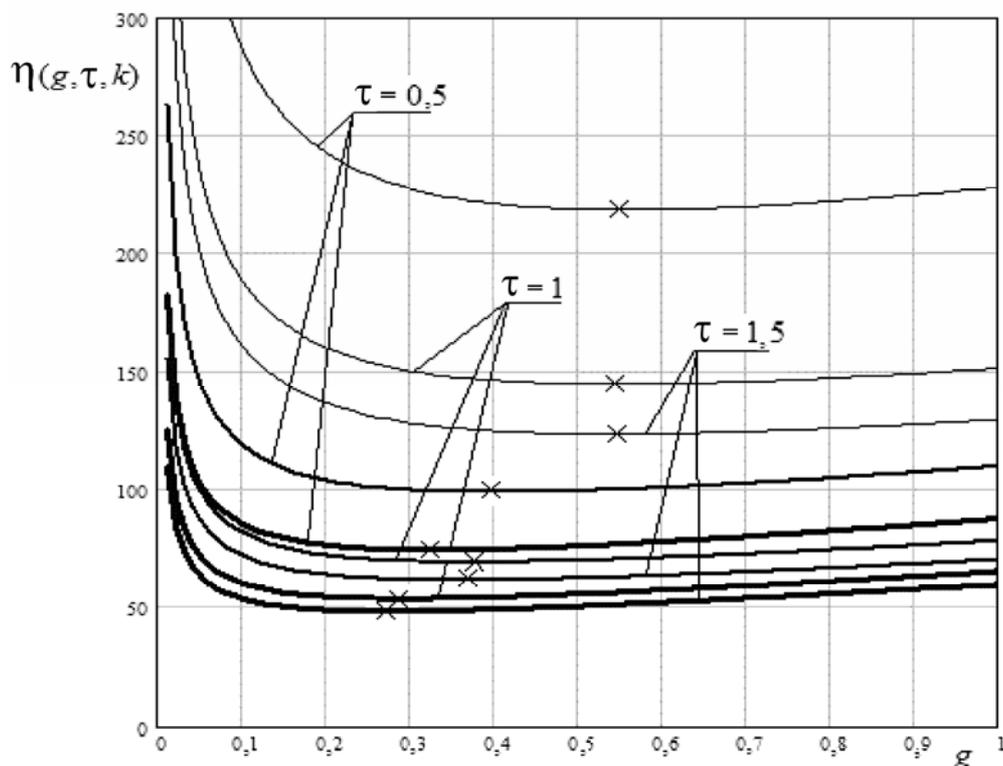


Рис. 1. Зависимость функции $\eta(g, \tau, k)$ от параметра g при различных τ и k :

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

где $m = \frac{R_3}{R}$ – безразмерный параметр, определяющий соотношение радиуса нагревателя R и радиуса измерительного зонда (сравниваемого тела) R_3 ;

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

логичной исходной КЗТ, но с использованием интегрального преобразования Ханкеля с конечным пределом по координате r ($0 \leq r \leq R_3$).

Как показал анализ зависимости (6), уменьшению $\delta_{\text{КБР}}(g, m)$ способствует увеличение m , и g .

В рассматриваемом методе используются интеграторы температуры, позволяющие получать информацию о температуре всего нагреваемого участка тела (круга радиусом R). Так как экспериментам подвергаются малые образцы (зонд устанавливается на плоский участок поверхности), выберем из всех возможных целых значений параметра m наименьшее $m_{\text{опт}} = 3$. При таком соотношении радиусов информация будет наиболее представительной, так как в эксперименте будет использоваться интегральная температура максимального участка доступной измерению поверхности без нарушения условий полуограниченности образца и измерительного зонда: для $m_{\text{опт}} = 3$ одна из составляющих методической погрешности $\delta_{\text{КБР}}(g_{\text{опт}}, m_{\text{опт}})$ не превышает 1 % при $g_{\text{опт}} = 0,55$ [4].

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

Для материала с искомой температуропроводностью a и заданным радиусом R существует оптимальное значение параметра p , а именно $p_{\text{опт}} = g_{\text{опт}} a / (R)^2$. Теоретически величина параметра интегрального преобразования Лапласа p

произвольна, что говорит о некоторой некорректности метода, поэтому возникает задача нахождения значения p такого, которое обеспечит определение ТФС с минимальной погрешностью. Данная задача может быть решена при проведении НК с помощью современных измерительно-вычислительных средств, позволяющих автоматизировать процессы измерения комплекса ТФС и адаптивного управления ходом эксперимента, обрабатывать большие объемы экспериментальных данных. При этом в автоматическом режиме могут быть рассчитаны ПВИХ температуры нагреваемого круга по измеренной информации для различных p , пока не будет найдено такое $p_{\text{опт}}$ при искомым ТФС, которое даст из уравнения НК

$$(2) \quad g = g_{\text{опт}} = 0,55;$$

При найденных из экспериментов $p_{\text{опт}}$, $\tau_{\text{опт}} = p_{\text{опт}} t_{\text{д}}$ 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.

Отметим, что математические модели существующих методов [1] предполагают, что тепловое воздействие осуществляется непрерывным во время эксперимента тепловым потоком. В этом случае температура в исследуемом образце при $t \gg 0$ достигает стационарного значения. Время достаточно длительное и, во-первых, способствует распространению тепла, а соответственно и температурного поля, а это может привести к нарушению условия полуограниченности по координатам r и z , что вызывает необходимость исследовать образцы значительных геометрических размеров и не позволяет проводить измерения на малых образцах. А при определенной малой длительности теплового воздействия $t_{\text{д}}$ температурное поле не успевает распространиться до заданных граничных поверхностей небольшого образца, что позволяет считать его полуограниченным в тепловом отношении телом. Во-вторых, из сравнения графиков подынтегральных функций выражения (1) найдено, что подынтегральная функция в случае дискретного теплового воздействия намного быстрее стремится к нулю, чем в случае непрерывного во время эксперимента нагревания, следовательно, для нахождения с достаточно высокой точностью значения ПВИХ $S^*(p)$ требуется информации о температуре исследуемого тела $S(t)$ за более короткий временной интервал.

Таким образом, предлагаемый процесс организации нагрева позволяет значительно сократить длительность рабочей стадии эксперимента при повышении точности метода, а также дает возможность адаптировать тепловые процессы в образцах различных форм малых размеров к достаточно простым математическим моделям на основании приведенных в данной статье процедур.

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. Чуриков, А.А. Метод неразрушающего теплофизического контроля образцов малых геометрических размеров из твердых материалов / А.А. Чуриков, Л.Л. Антонова // Вестник ТГТУ. – Тамбов. – 2005. – Т.11, № 3. – С. 618 – 624.
3. Осипова, В.И. Экспериментальные исследования процессов теплообмена / В.И. Осипова. – М. : Энергия, 1979. – 243 с.
4. Антонова, Л.Л. Определение оптимальных геометрических параметров измерительного зонда для неразрушающего теплофизического контроля / Л.Л. Антонова, А.А. Чуриков // Труды ТГТУ : сб. науч. трудов. – Тамбов : Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та. Вып.19. – С. 66 – 69.

OPTIMAL MODE DESIGN FOR NON-DESTRUCTIVE TESTING OF THERMOPHYSICAL PROPERTIES

L.L. Antonova, A.A. Churikov

Key words and phrases: time parameters; geometric parameters; integral parameters; minor samples; non-destructive testing; Laplace transformation; thermophysical properties.

Abstract: The method of non-destructive testing of thermophysical properties, based on discrete thermal effect on round surface is described. The computing technique for geometric and time parameters for measuring procedures is suggested providing determination of thermophysical properties with necessary accuracy.