

## О ТЕРМИЧЕСКИХ СОПРОТИВЛЕНИЯХ ПРИ НЕРАЗРУШАЮЩЕМ КОНТРОЛЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК МАТЕРИАЛОВ

Н.П. Жуков<sup>1</sup>, Ю.Л. Муромцев<sup>2</sup>, Н.Ф. Майникова<sup>3</sup>, И.В. Рогов<sup>1</sup>

*Кафедры: “Гидравлика и теплотехника” (1),  
“Конструирование радиоэлектронных и микропроцессорных систем” (2),  
“Теория машин, механизмов и детали машин” (3), ТГТУ*

**Ключевые слова и фразы:** импульсное тепловое воздействие; линейный источник тепла; математическое моделирование; метрологический анализ; погрешность измерений; температуропроводность; теплофизические характеристики материалов; теплопроводность.

**Аннотация:** Рассмотрено влияние термических сопротивлений между образцом и термоприемником на распределение температуры в исследуемом теле при импульсном тепловом воздействии от линейного источника.

### Обозначения и аббревиатуры

$a$ – температуропроводность, м <sup>2</sup> /с; $q$ – мощность, выделяемая на единицу длины нагревателя, Вт/м; $r$ – координата, м; $T$ – температура, К;	$\gamma \approx 0,5772$ – число Эйлера; $\lambda$ – теплопроводность, Вт/(м·К); $\tau$ – время, с; ТФХ – теплофизические характеристики.
---	---

Рассматривается метод неразрушающего контроля теплофизических характеристик (ТФХ) твердых материалов, в котором тепловое воздействие на исследуемое тело с равномерным начальным температурным распределением осуществляется с помощью линейного импульсного нагревателя. В эксперименте фиксируется температура на заданном расстоянии от нагревателя.

Теоретические предпосылки метода основаны на закономерностях начальной стадии развития теплового процесса и детально изложены в работах [1, 2]. Метод позволяет определить теплофизические характеристики (теплопроводность и температуропроводность) по рабочему участку термограммы, характеризующемуся регуляризацией тепловых потоков, с учетом фиксирования времени, в течение которого исследуемый объект можно считать полуограниченным [3].

Модель нестационарного теплопереноса от линейного импульсного источника тепла [1], действующего на теплоизолированной поверхности полуограниченного тела, предполагает выделение на термограммах трех участков (рис. 1).

Первый (I) участок характеризуется тем, что тепловой поток, проходящий через точку измерения, является переменным во времени.

Второй (II) участок термограммы характеризуется регуляризацией тепловых потоков (тепловой поток, проходящий через точку измерения, становится практически постоянным).

Третий (III) участок термограммы характеризуется тем, что нарушается условие неограниченности исследуемого образца, и тепловой поток, проходящий через точку измерения, становится переменным.

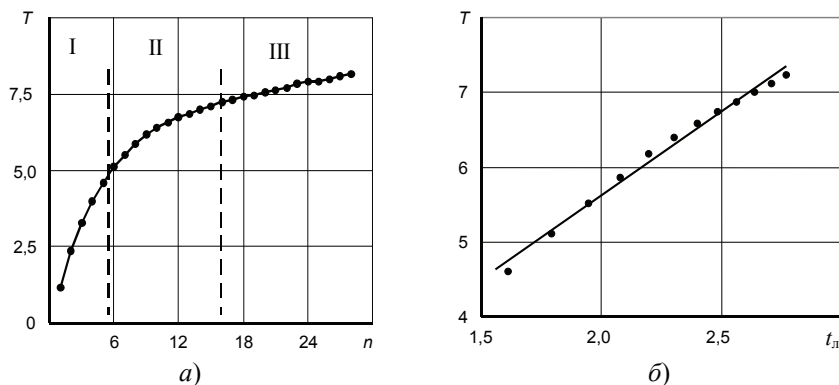


Рис. 1 Участки термограммы для материала «рипор» (а) и второй (рабочий) участок термограммы в координатах  $T = f(t_n)$  (б)

Согласно рассматриваемому методу термограмма на рабочем (втором) участке описывается уравнением:

$$T(t_n) = \frac{q}{2\pi\lambda} \left( t_n + \ln[a] - \ln \left[ \frac{r^2}{4\Delta\tau} \right] - \gamma \right), \quad (1)$$

где  $t_n = \ln[n]$ ,  $n = 1, 2, 3, \dots$ ;  $q$  – мощность, выделяемая на единицу длины нагревателя, Вт/м;  $r$  – расстояние от нагревателя, м;  $T$  – температура, К;  $a$  – температуропроводность, м<sup>2</sup>/с;  $\Delta\tau$  – приращение времени, с;  $\gamma \approx 0,5772$  – число Эйлера.

С учетом того, что измерения проводятся при установившемся стационарном поле тепловых потоков [2], а также считая, что выполняются условия, при которых можно пренебречь тепловыми потерями в материал зонда [4], для расчетной области термограммы можно записать

$$T_{тп} = \frac{q}{2\pi\lambda} \left( \ln \left[ \frac{4a\tau}{r^2} \right] - \gamma \right) - \Delta T_{тс}, \quad (2)$$

где  $T_{тп}$  – температура термоприемника, К;  $\Delta T_{тс}$  – разность между температурой термоприемника и температурой поверхности образца (рис. 2).

Значение  $\Delta T_{тс}$  можно представить в виде

$$\Delta T_{тс} = \bar{q}' R_{тс},$$

где  $\bar{q}'$  – тепловой поток между термоприемником и образцом, Вт/м;  $R_{тс}$  – термическое сопротивление между термоприемником и образцом, равное

$$R_{тс} = \frac{c}{\lambda_{тс}},$$

здесь  $c$  – толщина слоя между термоприемником и образцом, м;  $\lambda_{тс}$  – теплопроводность материала слоя, Вт/(м·К).

Величину  $R_{тс}$  можно считать постоянной в течение всего опыта.

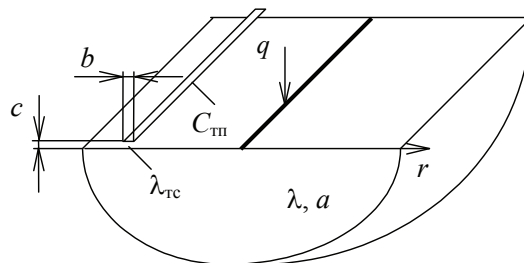


Рис. 2 Схема тепловой системы

Найдем приближенное значение  $\bar{q}'$ . Если можно пренебречь утечками тепла в материал зонда [4], то все тепло, поступающее к термоприемнику, идет только на его разогрев. Тогда

$$\bar{q}' = \frac{C_{\text{ТП}}}{b} \frac{\partial T_{\text{ТП}}}{\partial \tau} = \frac{C_{\text{ТП}}}{b} \left( \frac{q}{2\pi\lambda\tau} - \frac{\partial(\Delta T_{\text{ТП}})}{\partial \tau} \right), \quad (3)$$

где  $C_{\text{ТП}}$  – теплоемкость единицы длины термоприемника, Дж/(кг·К·м);  $b$  – ширина термоприемника, м.

Очевидно, что  $\frac{q}{2\pi\lambda\tau} > \frac{\partial(\Delta T_{\text{ТС}})}{\partial \tau}$ , так как в противном случае происходило бы не нагревание, а остывание термоприемника. С другой стороны, из выражения (3) видно, что  $\lim_{\tau \rightarrow \infty} \left( \frac{q}{2\pi\lambda\tau} \right) \rightarrow 0$ , т.е. в расчетной области термограммы  $\bar{q}' \approx 0$ , и

$$T_{\text{ТП}} = \frac{q}{2\pi\lambda} \left( \ln \left[ \frac{4a\tau}{r^2} \right] - \gamma \right)$$

при выполнении условия

$$\frac{\Delta T_{\text{ТП}}}{T(r, \tau)} \approx \frac{c C_{\text{ТП}}}{\lambda_{\text{ТС}} b \tau \left( \ln \left[ \frac{4a\tau}{r^2} \right] - \gamma \right)} \ll 1. \quad (4)$$

Отметим, что выражение (4) будет корректным только при малых значениях термических сопротивлений между образцом и термоприемником.

Из выражений (2) и (3) видно, что там, где условие (4) не выполняется, вид зависимости температуры от времени в точке измерения (термограммы) будет отличен от вида уравнения (1). В методе учитываются только те точки термограммы, где эти зависимости выполняются.

Таким образом, по результатам анализа точности измерения ТФХ разработанным методом можно сделать вывод о том, что термические сопротивления должны быть таковыми, чтобы выполнялось условие (4). В этом случае данным фактором в расчетной области термограммы можно пренебречь.

#### Список литературы

1. Жуков Н.П., Муромцев Ю.Л., Майникова Н.Ф. и др. Патент РФ № 2161301 RU, кл. G01 № 25/18. Способ неразрушающего определения теплофизических свойств материалов. Б.И. № 36, 2000 г.
2. Жуков Н.П., Муромцев Ю.Л., Майникова Н.Ф. и др. Моделирование процесса теплопереноса от импульсного линейного источника тепла при теплофизических измерениях // Вестник ТГТУ. – 2002. – Т. 8, № 2. – С. 182 -189.
3. Жуков Н.П., Муромцев Ю.Л., Майникова Н.Ф. и др. Определение теплофизических свойств материалов неразрушающим способом // Вестник ТГТУ. – 2002. – Т. 8, № 1. – С. 54 – 61.
4. Рогов И.В. Разработка теплофизических методов и средств для неразрушающего контроля физико-механических свойств композиционных материалов. – Дисс. ... канд. техн. наук. – Тамбов: ТГТУ, 1999. – 169 с.

## To the Thermal Resistance of Thermo-Physical Characteristics of Materials at Non-Destructive Control

N.P. Zhukov, Yu.L. Muromtsev, N.F. Mainikova, I.V. Rogov

*Departments: "Hydraulics and Heat Engineering" (1),  
"Design of Radio-electronic and Microprocessor Systems" (2),  
"Theory of Machines, Mechanisms and Machine Elements" (3), TSTU*

**Key words and phrases:** impulse heat influence; linear heat source; mathematical modeling; metrological analysis; measurement error; thermal diffusivity; thermo-physical characteristics of materials; heat conduction.

**Abstract:** The influence of thermal resistance between the sample and temperature transmitter on the temperature distribution in the examined body under impulse thermal influence from linear source is considered.

---

## Über die thermischen Widerstände bei der ununterbrochenen Kontrolle der wärme-physikalischen Charakteristiken der Stoffe

**Zusammenfassung:** Es ist die Einwirkung der thermischen Widerstände zwischen dem Muster und dem Thermoempfänger auf die Verteilung der Temperatur im untersuchenden Körper bei dem Impulswärmeeinfluß von der Linearquelle betrachtet.

---

## Sur la résistance thermique au cours du contrôle non destructif des caractéristiques thermophysiques des matériaux

**Résumé:** Est examinée l'influence des résistances thermiques entre un échantillon et un récepteur thermique dans un corps étudié avec une action thermique d'impulsion à partir de la source linéaire.

---