

УДК 53.088

АНАЛИЗ ПОГРЕШНОСТЕЙ
ИЗМЕРЕНИЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК
МАТЕРИАЛОВ ПРИ ИМПУЛЬСНОМ ТЕПЛОВОМ ВОЗДЕЙСТВИИ
ОТ ЛИНЕЙНОГО ИСТОЧНИКА
ЧАСТЬ 1. ОЦЕНКА СЛУЧАЙНЫХ ПОГРЕШНОСТЕЙ

Н.П. Жуков¹, Н.Ф. Майникова², И.В. Рогов¹

Кафедры: “Гидравлика и теплотехника” (1),
“Теория механизмов, машин и детали машин” (2), ТГТУ

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

Аннотация: Приводятся результаты оценки случайных составляющих погрешностей измерения теплофизических характеристик материалов при импульсном тепловом воздействии от линейного источника. Метрологический анализ выполняется на расчетной основе с использованием адекватной математической модели.

Обозначения и аббревиатуры

a – температуропроводность, м²/с;
 T – температура, К;
 λ – теплопроводность, Вт/(м·К);
 τ – время, с;

$\Delta\lambda$ – абсолютная погрешность определения теплопроводности;
 Δa – абсолютная погрешность определения температуропроводности;
ТФХ – теплофизические характеристики.

В случае неразрушающего контроля материалов активными тепловыми методами искомые теплофизические характеристики проявляются через температурный отклик исследуемого образца на тепловое воздействие, которому подвергается образец (или изделие) в специально организованном эксперименте. Анализ процессов измерения, их моделей и источников погрешностей показывает, что в пределах временного интервала измерения в тепловой системе могут происходить существенные изменения, которые не позволяют описывать весь процесс измерения одной аналитической моделью с неизменными ограничениями и условиями. Неучет данного обстоятельства ведет к существенному увеличению погрешностей при определении ТФХ неразрушающими методами.

Разработанный метод неразрушающего контроля ТФХ [1, 2] основан на аналитическом решении математической модели процесса теплопереноса в исследуемом теле от действия линейного импульсного источника тепла для рабочего участка термограммы.

Рабочему участку термограммы соответствует тепловой режим опыта, прошедший стадию регуляризации. Согласно рассматриваемому методу [1] термограмма на рабочем участке описывается уравнением

Работа выполнена при научном консультировании профессора Ю.Л. Муромцева.

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

где $t_n = \ln[n]$; q – мощность, выделяющаяся на единицу длины нагревателя, Вт/м; r – расстояние от нагревателя, м; $\gamma \approx 0,5772$ – число Эйлера; T – температура, К; a – температуропроводность, м²/с; $\Delta\tau$ – приращение времени, с.

Как видно из данного выражения, на термограмме рабочему участку будет соответствовать прямолинейный участок в координатах $-T, (t_n)$. Представим выражение (1) в виде

$$T(t_n) = b_1 t_n + b_0,$$

тогда расчет ТФХ и постоянных прибора производится по формулам:

$$\lambda = \frac{\alpha}{b_1}, \quad (2)$$

$$a = \exp \left[\frac{b_0}{b_1} + \beta \right], \quad (3)$$

$$\alpha = \lambda_0 b_{10}, \quad (4)$$

$$\beta = \ln[a_0] - \frac{b_{00}}{b_{10}}, \quad (5)$$

где $\lambda, a, \lambda_0, a_0$ – теплопроводности и температуропроводности исследуемого материала и образцовой меры ТФХ; b_0, b_1, b_{00}, b_{10} – коэффициенты, определенные из термограмм, снятых на исследуемом материале и образцовой мере.

Выражения для оценки случайных погрешностей измерения теплопроводности и температуропроводности для разработанного метода контроля ТФХ по методике, приведенной в [4], имеют следующий вид:

$$\delta\lambda = \sqrt{\delta^2\alpha + \delta^2 b_1}, \quad (6)$$

$$\delta a = \sqrt{(\delta^2 b_0 + \delta^2 b_1) \left(\frac{b_0}{b_1} \right)^2 + \Delta^2 \beta}, \quad (7)$$

$$\delta\alpha = \sqrt{\delta^2\lambda_0 + \delta^2 b_{10}}, \quad (8)$$

$$\delta\beta = \sqrt{\delta^2 a_0 + (\delta^2 b_{00} + \delta^2 b_{10}) \left(\frac{b_{00}}{b_{10}} \right)^2}. \quad (9)$$

Согласно примененной методике сначала найдены дифференциалы от левых и правых частей уравнений (2) – (5). Далее произвели замены, принятые в теории погрешностей: $d\lambda \approx \Delta\lambda, da \approx \Delta a, db_1 \approx \Delta b_1, da \approx \Delta a, db_0 \approx \Delta b_0, db_{00} \approx \Delta b_{00}, db_{10} \approx \Delta b_{10}, da_0 \approx \Delta a_0$, где $\Delta\lambda, \Delta\alpha, \Delta b_1, \Delta a, \Delta b_0, \Delta b_{00}, \Delta b_{10}, \Delta a_0$ – абсолютные погрешности определения $\lambda, \alpha, b_1, a, b_0, b_{00}, b_{10}, a_0$. С учетом этой замены вводим относительные погрешности: $\delta\alpha = \Delta\alpha/\alpha, \delta b_1 = \Delta b_1/b_1$ и т.д.

Данная методика, примененная к формулам (2) – (5), позволила получить зависимости (6) – (9). Проанализируем выражения (6) и (7) на предмет того, в каком диапазоне можно проводить измерения ТФХ и каким образом его можно расширить. Прежде всего, отметим, что погрешность расчета констант прибора будет определяться погрешностью, связанной с неточностью информации о ТФХ образцовой меры. Абсолютную погрешность определения коэффициентов b_0, b_1 можно в первом приближении принять постоянной, так как она будет определяться погрешностью измерения температуры (которую можно считать постоянной от опыта к опыту).

Тогда из выражения (6) можем записать

$$\delta\lambda = \sqrt{\delta^2\alpha + \frac{\Delta^2 b_1 \lambda^2}{\alpha^2}} . \quad (10)$$

Как видно из уравнения (10), относительная погрешность $\delta\lambda$ будет зависеть от самой величины λ (рис. 1) и будет увеличиваться с возрастанием теплопроводности материала образца. Из выражения (10) также следует, что погрешность можно снизить путем увеличения коэффициента α . Это можно сделать за счет увеличения количества тепла, которое выделяется на нагревателе, за счет увеличения длительности импульсов и мощности на нагревателе ($\alpha \sim q$, см. [3]).

Рассмотрим формулу (7). Из нее с учетом формул (4), (5) можем записать

$$\delta a = \sqrt{\left(\Delta^2 b_0 + \Delta^2 b_1 (\ln(a) - \beta)^2\right) \frac{\lambda^2}{\alpha^2} + \Delta^2 \beta} . \quad (11)$$

Из зависимости (11) видно, что относительная погрешность определения температуропроводности δa будет зависеть от a и λ образца (рис. 2), причем определяющим будет коэффициент теплопроводности λ . С его увеличением растет относительная погрешность измерения температуропроводности δa . Из уравнения (11) также видно, что уменьшения относительной погрешности измерения a можно добиться за счет увеличения постоянной прибора α .

На основании выражений (10) и (11) можно провести оценку погрешности определения ТФХ по диапазону их изменения. На рис. 1 и 2 приведены результаты такой оценки.

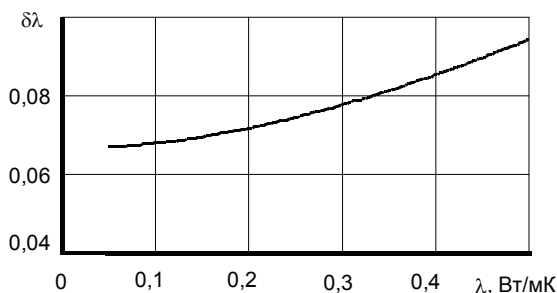


Рис. 1 Зависимость $\delta\lambda = f(\lambda)$, рассчитанная по формуле (10)

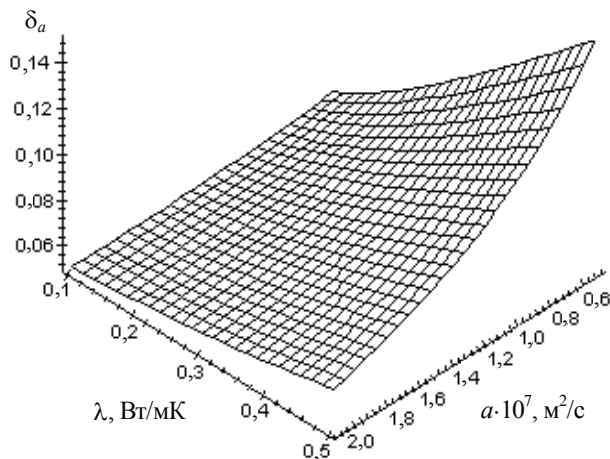


Рис. 2 Зависимость $\delta a = f(\lambda, a)$, рассчитанная по формуле (11)

Наряду с исследованием случайной составляющей погрешности определения ТФХ представляет интерес рассмотреть вопросы влияния на точность измерения систематической погрешности, вызванной неточностью математической модели (1) – (3), а также оценить среднеарифметические значения ТФХ и их абсолютные погрешности, получить сравнительные данные по ряду методов и др. [1 – 3]. Эти вопросы будут изложены в последующих частях работы, которые планируется опубликовать также в журнале «Вестник ТГТУ».

Список литературы

1. 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.
2. 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. – 2000. – Б.И. № 36.
3. Рогов И.В. Разработка теплофизических методов и средств для неразрушающего контроля физико-механических свойств композиционных материалов: Дисс. ... к.т.н. – Тамбов, 1999. – 169 с.
4. Химмельблау Д. Анализ процессов статистическими методами. – М.: Мир, 1973. – 960 с.

Analysis of Measurement Errors of Thermophysical Characteristics of Materials Under Impulse Heat Influence From Linear Source Part 1. Evaluation of Unbiased Errors

N.P. Zhukov¹, N.F. Mainikova², I.V. Rogov¹

*Departments: “Hydraulics and Heat Engineering” (1);
“Theory of Machine Mechanisms and Machine Parts” (2), TSTU*

Key words and phrases: impulse heat influence; linear heat source; mathematical modeling; metrological analysis; measurement errors; thermal physical characteristics of materials; heat conductivity; thermal diffusivity.

Abstract: The results of evaluation of occasional measurement errors of thermal physical characteristics of materials under the impulse heat influence from linear source are given. Metrological analysis is carried out on the calculation basis using the adequate mathematical model.

Fehleranalyse der Messung von wärmephysikalischen Charakteristiken der Stoffe bei der impulsiven Wärmeeinwirkung von der Linearquelle

Zusammenfassung: Es werden die Ergebnisse der Einschätzung der Zufallskomponenten der Fehler der Messung von wärmephysikalischen Charakteristiken der Stoffe bei der impulsiven Wärmeeinwirkung von der Linearquelle angeführt. Die metrologische Analyse wird auf Kalkulationsgrund mit der Benutzung des adequate mathematischen Modells durchgeführt.

Analyse des erreurs des mesures des caractéristiques thermophysiques des matériaux avec une action thermique d’impulsion à partir de la source linéaire

Résumé: On cite les résultats de l’appréciation des composants occasionnels des erreurs des mesures des caractéristiques thermophysiques des matériaux avec une action thermique d’impulsion à partir de la source linéaire. L’analyse métrologique est effectuée à la base de calcul avec l’emploi du modèle mathématique adéquat.