



Оптимизация процесса обработки экспериментальных данных и основного конструкционного размера устройства при измерении теплофизических свойств теплоизоляционных материалов методом плоского и мгновенного источника теплоты

С.В. Пономарев

д.т.н., профессор кафедры «Управление качеством и сертификация» ФГБОУ ВПО «Тамбовский государственный технический университет»; г. Тамбов

В.О. Буланова

студентка гр. ММК-21 магистратуры кафедры «Управление качеством и сертификация» ФГБОУ ВПО «Тамбовский государственный технический университет»; г. Тамбов

А.Г. Дивин

д.т.н., профессор, заведующий кафедрой «Управление качеством и сертификация» ФГБОУ ВПО «Тамбовский государственный технический университет»; г. Тамбов

Е.В. Буланов

производитель работ «ООО Компания «Козерог»; г. Тамбов

В данной статье рассматривается методика выбора как оптимальных условий обработки экспериментальных данных, так и рационального значения основного конструкционного размера устройства для измерения теплофизических свойств методом плоского импульсного источника теплоты.

Физическая модель измерительного устройства представляет собой ячейку, в которую помещают образец, состоящий из трех пластин: нижней, средней и верхней. Наиболее высокие требования предъявляются к точности изготовления средней пластины заданной толщины x , грани которой должны быть выполнены строго параллельно друг другу. Между нижней и средней пластинами обычно размещают малоинерционный плоский нагреватель, а между средней и верхней пласти-

нами устанавливают первичный измерительный преобразователь температуры, например термопару. Конструкции аналогичных измерительных устройств подробнее рассмотрены в [1-5].

Математическая модель температурного поля $T(x, \tau)$ в плоском образце (в случае использования импульсного плоского источника теплоты) может быть записана в виде:

$$\frac{\partial T(x, \tau)}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 T(x, \tau)}{\partial x^2}, \tau > 0, 0 < x < \infty, \quad (1)$$

$$T(x, 0) = T_0 = 0, \quad (2)$$

$$-\lambda \frac{\partial T(0, \tau)}{\partial x} = q(\tau, \tau_u) = q_c [h(\tau) - h(\tau - \tau_u)], \quad (3)$$

$$T(\infty, \tau) = T_0 = 0, \quad (4)$$

где x, τ – пространственная координата образца и время; a, λ – коэффициент температуропроводности и теплопроводность исследуемого материала; T_0 – первоначальная температура материала (в момент времени $\tau = 0$), принимаемая за начало температурной шкалы в каждом эксперименте, то есть $T_0 = 0$; τ_u – длительность реального (не мгновенного) теплового импульса, подводимого к нагревателю; $q(\tau, \tau_u)$ – импульсный плоский источник теплоты; q_c – тепловой поток, подводимый к образцу через поверхность $x = 0$ в течение промежутка времени $0 < \tau \leq \tau_u$; $h(\tau), h(\tau - \tau_u)$ – единичные ассиметричные ступенчатые функции, задаваемые соотношениями [6, 7]:

$$h(\tau) = \begin{cases} 0 & \text{при } \tau < 0, \\ 1 & \text{при } \tau \geq 0; \end{cases} \quad h(\tau - \tau_u) = \begin{cases} 0 & \text{при } \tau < \tau_u, \\ 1 & \text{при } \tau \geq \tau_u. \end{cases} \quad (5)$$

Используемое в математической модели (1) – (4) соотношение (3) графически проиллюстрировано на рис. 1а.

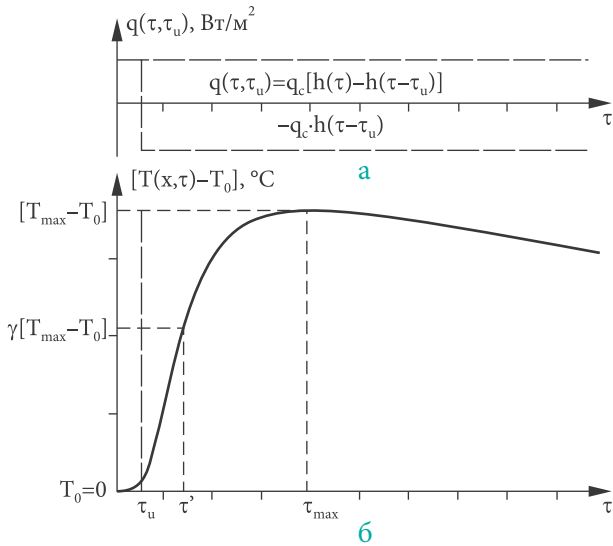


Рис. 1. Изменение во времени τ физических величин:

а – теплового импульса представляющего собой алгебраическую сумму ступенчатых функций
б – разности температур $[T(x, \tau) - T_0]$ на расстоянии x от плоского импульсного источника теплоты

На основе использования принципа суперпозиции решение краевой задачи (1) – (4) с учетом (5) принимает вид [7]:

$$T(x, \tau) - T_0 = \frac{2q_c}{\lambda} \cdot f(x, \tau, \tau_u, a), \quad (6)$$

$$\text{где } f(x, \tau, \tau_u, a) = \quad (7)$$

$$= \begin{cases} \sqrt{a\tau} \cdot \text{ierfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{a\tau}}\right) & \text{при } 0 < \tau < \tau_u, \\ \sqrt{a\tau} \cdot \text{ierfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{a\tau}}\right) - \sqrt{a(\tau - \tau_u)} \cdot \text{ierfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{a(\tau - \tau_u)}}\right) & \text{при } \tau > \tau_u, \end{cases}$$

$$\text{ierfc}(u) = \int_u^\infty \text{erfc}(W) = \frac{1}{\sqrt{\pi}} e^{-u^2} - u \text{erfc}(u) \quad - \text{специальная}$$

функция [7], представляющая собой интеграл от функции

$$\text{erfc}(W) = 1 - \text{erf}(W); \text{erf}(W) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^W e^{-W^2} dW \quad -$$

функция ошибок Гаусса [6, 7].

Для времени $\tau \geq \tau_u$ решение (6) с учетом (7) принимает вид:

$$T(x, \tau) - T_0 = \frac{q_c x}{\lambda} \left[\frac{\text{ierfc}\left[\frac{U(\tau)}{2\sqrt{a\tau}}\right]}{U(\tau)} - \frac{\text{ierfc}\left[\frac{U(\tau - \tau_u)}{2\sqrt{a(\tau - \tau_u)}}\right]}{U(\tau - \tau_u)} \right], \quad (8)$$

где $U(\tau) = \frac{x}{2\sqrt{a\tau}}$, $U(\tau - \tau_u) = \frac{x}{2\sqrt{a(\tau - \tau_u)}}$ – безразмерные функции, зависящие от x, τ, τ_u, a , причем,

$$U(\tau - \tau_u) = \frac{x}{2\sqrt{a(\tau - \tau_u)}} = \frac{x}{2\sqrt{a\tau \left(\frac{\tau - \tau_u}{\tau}\right)}} = U(\tau) \sqrt{\frac{\tau}{\tau - \tau_u}}.$$

График зависимости (8) приведен на рис. 1б.

Из рис. 1б видно, что рассчитанное по формуле (8) изменение разности температур $[T(x, \tau) - T_0]$ в момент времени $\tau = \tau_{\max}$ достигает максимальное значение $[T_{\max} - T_0] = [T(x, \tau_{\max}) - T_0]$, причем, этому моменту времени $\tau = \tau_{\max}$ соответствует определенное значение безразмерной функции

$$U^m = U(\tau_{\max}) = \frac{x}{2\sqrt{a\tau_{\max}}}.$$

Традиционный подход к проведению эксперимента и последующей обработке полученных данных при измерении ТФС методом импульсного источника теплоты состоит в следующем [1, 2, 5, 8, 9]:

- изготавливают образец исследуемого материала в виде трех пластин, между этими пластинами размещают плоский нагреватель и термопару, а затем дожидаются достижения равномерного распределения температурного поля $T(x, \tau) = T_0 = \text{const}$ внутри образца исследуемого материала;
- в течение заданного промежутка времени $0 < \tau \leq \tau_u$; на плоский электронагреватель площадью S подают постоянную мощность P и по сигналу термопары регистрируют изменение разности температур $[T(x, \tau) - T_0]$;
- по полученным экспериментальным данным определяют максимальное значение разности температур $[T_{\max} - T_0] = [T(x, \tau_{\max}) - T_0]$ и значение момента времени $\tau = \tau_{\max}$, соответствующее этому максимальному значению $[T_{\max} - T_0]$;
- по полученным значениям $\tau_{\max}$, $T_{\max} - T_0$ с учетом известных x , $q_c = P/2S$ вычисляют искоемые значения коэффициента температуропроводности a и теплопроводности λ исследуемого материала.

Недостатком рассмотренного порядка проведения эксперимента и обработки полученных данных является то, что при этом значение момента времени $\tau = \tau_{\max}$ по экспериментальным данным определяется с высокой относительной погрешностью, зачастую достигающей величины (15...20)%.

Разработанная методика обработки экспериментальных данных основана на том, что в рассмотрение вводится безразмерный параметр

$$\gamma = \frac{T(x, \tau) - T_0}{T_{\max} - T_0}, \quad (9)$$



представляющий собой отношение текущего значения разности температур $[T(x, \tau) - T_0]$, имеющего место в момент времени τ , к максимальному значению $[T_{max} - T_0] = [T(x, \tau_{max}) - T_0]$ разности температур в момент времени $\tau = \tau_{max}$.

Из рис. 1 видно, что каждой величине разности температур $\gamma \cdot [T_{max} - T_0] = [T(x, \tau') - T_0]$, то есть каждому значению безразмерного параметра γ , соответствует конкретное значение момента времени τ' и, следовательно, безразмерной функции

$$U(\tau') = \frac{x}{2\sqrt{a\tau'}}.$$

При численном моделировании процесса измерения на компьютере – сначала по формуле (8) вычисляли значение разностей температур $T(x, \tau) - T_0$, а затем методом перебора определяли максимальное значение этой разности температур, которое аналитически записывается в виде:

$$T_{max} - T_0 = [T(x, \tau_{max}) - T_0] = \frac{q_c x}{\lambda} \left\{ \frac{\text{ierfc}[U(\tau_{max})]}{U(\tau_{max})} - \frac{\text{ierfc}[U(\tau_{max} - \tau_u)]}{U(\tau_{max} - \tau_u)} \right\}. \quad (10)$$

Поделив (8) на (10), получаем уравнение:

$$\gamma = \frac{T(x, \tau) - T_0}{T_{max} - T_0} = \frac{\frac{\text{ierfc}[U(\tau)]}{U(\tau)} - \frac{\text{ierfc}[U(\tau - \tau_u)]}{U(\tau - \tau_u)}}{\frac{\text{ierfc}[U(\tau_{max})]}{U(\tau_{max})} - \frac{\text{ierfc}[U(\tau_{max} - \tau_u)]}{U(\tau_{max} - \tau_u)}},$$

которое легко может быть преобразовано к виду:

$$\gamma = \frac{T(x, \tau) - T_0}{T_{max} - T_0} = \frac{\frac{\text{ierfc}[U(\tau)]}{U(\tau)} - \frac{\text{ierfc}\left[U(\tau)\sqrt{\frac{\tau}{\tau - \tau_u}}\right]}{U(\tau)\sqrt{\frac{\tau}{\tau - \tau_u}}}}{\frac{\text{ierfc}[U(\tau_{max})]}{U(\tau_{max})} - \frac{\text{ierfc}\left[U(\tau_{max})\sqrt{\frac{\tau_{max}}{\tau_{max} - \tau_u}}\right]}{U(\tau_{max} - \tau_u)}}, \quad (11)$$

где принято во внимание, что

$$U(\tau - \tau_u) = \frac{x}{2\sqrt{a(\tau - \tau_u)}} = \frac{x}{2\sqrt{a\tau\left(\frac{\tau - \tau_u}{\tau}\right)}} = U(\tau) \cdot \sqrt{\frac{\tau}{\tau - \tau_u}}.$$

Если в ходе проведения эксперимента определена величина $T_{max} - T_0$, то (при заранее заданном значении безразмерного параметра γ) путем решения уравнения (11) находят величину безразмерной функции

$$U(\tau') = \frac{x}{2\sqrt{a\tau'}}.$$

Из последнего соотношения получаем формулу для вычисления искомого значения коэффициента температуропроводности:

$$a = \frac{x^2}{4\tau' [U(\tau')]^2}, \quad (12)$$

а с учетом соотношения (8) получаем формулу для вычисления теплопроводности:

$$\lambda = \frac{q_c x}{[T(x, \tau') - T_0]} \Phi[U(\tau'), \tau_u, \tau'], \quad (13)$$

где

$$\Phi[U(\tau'), \tau_u, \tau'] = \frac{\text{ierfc}[U(\tau')]}{U(\tau')} - \frac{\text{ierfc}\left[U(\tau')\sqrt{\frac{\tau'}{\tau' - \tau_u}}\right]}{U(\tau')\sqrt{\frac{\tau'}{\tau' - \tau_u}}}.$$

Обоснование выбора оптимального значения безразмерного параметра γ

В соответствии с рекомендациями теории погрешностей [1, 5, 10-12], после логарифмирования зависимости (12) и последующего определения дифференциала от левой и правой частей, получаем:

$$\begin{aligned} \ln a &= 2\ln x - \ln 4 - \ln \tau' - 2\ln U(\tau'), \\ d\ln a &= 2d\ln x - d\ln 4 - d\ln \tau' - 2d\ln U(\tau') \\ \frac{da}{a} &= 2\frac{dx}{x} - \frac{d4}{4} - \frac{d\tau'}{\tau'} - 2\frac{dU(\tau')}{U(\tau')}. \end{aligned} \quad (14)$$

Проведя принятую в теории погрешностей [1, 12]:

- замену дифференциалов $da \approx \Delta a$, $dx \approx \Delta x$, $d\tau' \approx \Delta \tau'$, $dU(\tau') \approx \Delta U(\tau')$, на абсолютные погрешности Δa , Δx , $\Delta \tau'$, $\Delta U(\tau')$;

- принимая во внимание, что дифференциал константы $d4=0$;

- заменив знаки «-» знаками «+» в (14), получаем выражение для вычисления так называемой предельной оценки относительной погрешности измерения коэффициента температуропроводности:

$$\left(\frac{\Delta a}{a}\right)_{\text{пр}} = 2\frac{\Delta x}{x} + \frac{\Delta \tau'}{\tau'} + 2\frac{\Delta U(\tau')}{U(\tau')} \quad \text{или}$$

$$(\delta a)_{\text{пр}} = 2\delta x + \delta \tau' + 2\delta U(\tau'), \quad \text{где}$$

$$\delta a_{\text{пр}} = \frac{\Delta a}{a}, \quad \delta x = \frac{\Delta x}{x}, \quad \delta \tau' = \frac{\Delta \tau'}{\tau'}, \quad \delta U(\tau') = \frac{\Delta U(\tau')}{U(\tau')} -$$

относительные погрешности определения соответствующих физических величин $a, x, \tau', U(\tau')$.

После перехода (по рекомендациям [1, 5, 10-13] от предельной $(\delta a)_{\text{пр}}$ к среднеквадратичной оценке $(\delta a)_{\text{ск}}$ погрешности определения коэффициента температуропроводности, получаем:

$$(\delta a)_{\text{ск}} = \sqrt{4(\delta x)^2 + (\delta \tau')^2 + 4[\delta U(\tau')]^2}. \quad (15)$$

Рассмотрим подробнее порядок определения погрешностей, входящих в последнее выражение (15). Принимая во внимание, что значение момента времени τ' зависит от безразмерного параметра γ , то есть $\tau' = \tau'(\gamma)$ получаем

$$\delta[U(\tau'(\gamma))] = \delta U'(\gamma) \approx \frac{dU'(\gamma)}{U'(\gamma)} = \frac{1}{U'} \frac{dU'}{d\gamma} d\gamma \approx \frac{1}{U'} \frac{dU'}{d\gamma} \cdot \gamma.$$

Для определения абсолютной погрешности выполним (по аналогии с изложенным выше) преобразования формулы (9) и получим:

$$(\delta \gamma)_{\text{ск}} = \sqrt{\left[\frac{\Delta T}{T(x, \tau') - T_0}\right]^2 + \left[\frac{\Delta T}{T_{\text{max}} - T_0}\right]^2} =$$

$$= \delta(T_{\text{max}} - T_0) \sqrt{\frac{1}{\gamma^2} + 1}$$

или

$$\Delta \gamma = \gamma \delta(T_{\text{max}} - T_0) \sqrt{\frac{1}{\gamma^2} + 1} = \delta(T_{\text{max}} - T_0) \cdot \sqrt{1 + \gamma^2}, \quad (16)$$

где ΔT – абсолютная погрешность измерения разности температур; $\delta(T_{\text{max}} - T_0)$ – относительная погрешность измерения максимального значения разности температур $T_{\text{max}} - T_0$; $\Delta \gamma, (\delta \gamma)_{\text{ск}}$ – абсолютная и среднеквадратичная относительная погрешности определения безразмерного параметра γ по экспериментально измеренным значениям разностей температур $[T(x, \tau') - T_0]$ и $[T_{\text{max}} - T_0]$.

Входящая в (15) относительная погрешность $\delta \tau'$ определения момента времени τ' также связана с погрешностями измерения разностей температур $[T(x, \tau') - T_0]$.

Из соотношения $\frac{\partial [T(x, \tau) - T_0]}{\partial \tau} \bigg|_{\tau=\tau'} \approx \frac{\Delta T}{\Delta \tau}$, получаем

$$\delta \tau' = \frac{\Delta \tau'}{\tau'} = \frac{\Delta T}{\tau' \left\{ \frac{\partial [T(x, \tau) - T_0]}{\partial \tau'} \right\} \bigg|_{\tau=\tau'}}, \quad (17)$$

где $\Delta \tau', \delta \tau'$ – абсолютная и относительная погрешности определения момента времени τ' , соответствующего заданному значению безразмерного параметра γ .

Подставив (16), (17) в формулу (15), получаем соотношение

$$(\delta a)_{\text{ск}} = \quad (18)$$

$$\sqrt{4(\delta x)^2 + \left[\frac{\Delta T}{\tau' \left\{ \frac{d[T(s, \tau) - T_0]}{d\tau'} \right\}} \right]^2 + \left[\frac{1}{U'} \cdot \frac{dU'}{d\gamma} \cdot \sqrt{\gamma^2 + 1} \cdot \delta(T_{\text{max}} - T_0) \right]^2},$$

использованное в дальнейших расчетах с целью выявления оптимального значения безразмерного параметра γ (при измерении коэффициента температуропроводности a).

При выполнении работ (с целью получить соотношение для вычисления среднеквадратичной оценки относительной погрешности $(\delta \lambda)_{\text{ск}}$ измерения температуропроводности λ) с учетом того, что при каждом значении длительности τ_u теплового импульса значения:

- момента времени $\tau' = \tau'(\gamma)$;
- безразмерной функции $U(\tau'(\gamma)) = U'(\gamma)$ зависят от безразмерного параметра γ , формула (13) для вычисления теплопроводности λ была представлена в виде:

$$\lambda = \frac{q_c x}{[T(x, \tau(\gamma)) - T_0]} \cdot F(\gamma), \quad (19)$$

где $F(\gamma) = \Phi[U(\tau'(\gamma)), U(\tau'(\gamma) = \tau_u)]$.

В результате преобразований, выполненных на основе теории погрешностей [1, 5, 10–13] по аналогии с изложенными выше действиями с формулами (12)–(18), на основе формулы (19) была получена зависимость для вычисления среднеквадратичной оценки относительных погрешностей измерения $(\delta \lambda)_{\text{ск}}$ теплопроводности, имеющая вид:

$$(\delta \lambda)_{\text{ск}} = \quad (20)$$

$$= \sqrt{(\delta q_c)^2 + (\delta x)^2 + \left[\frac{1}{F(\gamma)} \cdot \frac{dF(\gamma)}{d\gamma} \cdot \sqrt{\gamma^2 + 1} \cdot \delta(T_{\text{max}} - T_0) \right]^2 + \left[\frac{\Delta T}{T(x, \tau) - T_0} \right]^2}.$$

Результаты численного моделирования среднеквадратичных относительных погрешностей измерения коэффициента температуропроводности a и теплопроводности λ

С использованием полученных формул (18) и (20) были рассчитаны зависимости среднеквадратичных относительных погрешностей $(\delta a)_{\text{СК}}$ $(\delta \lambda)_{\text{СК}}$ при длительности теплового импульса $\tau_{\text{и}} = 10$ с. При этом в расчетах были использованы следующие исходные данные: $q_c = 2750$ Вт/м², $a = 1,06 \cdot 10^{-7}$ м²/с, $\lambda = 0,194$ Вт/м·К, $\Delta q_c = 68,75$ Вт/м²; $x = (2 \dots 8)$ мм, $\Delta x = 0,1$ мм; $\Delta T = 0,05$ К.

В процессе выполненных исследований стало очевидно, что минимальные значения относительных погрешностей $(\delta a)_{\text{СК}}$, $(\delta \lambda)_{\text{СК}}$ зависят не только от величины безразмерного параметра γ , но и от значения расстояния x от плоскости размещения нагревателя до плоскости установки термопары, измеряющей разность температур $[T(x, \tau') - T_0]$. В связи с этим было принято решение построить линии равных уровней погрешностей на плоскости с координатами γ и x . Результаты этой работы представлены на рис. 3.

Эти результаты вычислений показывают, что (при использованных в расчетах исходных данных) минимальные значения среднеквадратичных относительных погрешностей $(\delta a)_{\text{СК}}$ измерения коэффициента температуропроводности a достигаются при значениях безразмерного параметра в диапазоне $0,45 < \gamma \leq 0,47$ и при значениях основного конструкционного размера измерительного устройства в пределах $4 \text{ мм} < x \leq 4,5 \text{ мм}$.

В тоже время, минимальные значения среднеквадратичных относительных погрешностей $(\delta \lambda)_{\text{СК}}$ измерения теплопроводности λ имеют место при $0,95 < \gamma \leq 1,0$ и $2,8 < x \leq 3,0$.

Таким образом:

- для достижения минимальных значений погрешности $(\delta a)_{\text{СК}}$ при измерении коэффициента температуропроводности a , следует использовать образец исследуемого материала с толщиной пластины $4,2 \text{ мм} < x \leq 4,5 \text{ мм}$ и обработку экспериментальных данных следует вести при $0,45 < \gamma \leq 0,47$;
- для обеспечения минимальных значений погрешности $(\delta \lambda)_{\text{СК}}$ при измерении теплопроводности λ требуется использовать образец с толщиной средней пластины $2,8 \text{ мм} < x \leq 3,0 \text{ мм}$, а обработку экспериментальных данных осуществлять при $0,95 < \gamma \leq 1,0$.

Если же необходимо одновременно осуществить измерение коэффициента температуропроводности a и теплопроводности λ в одном эксперименте, то толщину x средней пластины образца из исследуемого материала следует выбирать из диапазона $3,5 \text{ мм} < x \leq 3,8 \text{ мм}$, что обеспечивает относительные погрешности измерений порядка $(\delta a)_{\text{СК}} \approx (6,0 \dots 7,1)\%$ и $(\delta \lambda)_{\text{СК}} \approx (5,6 \dots 6,3)\%$.

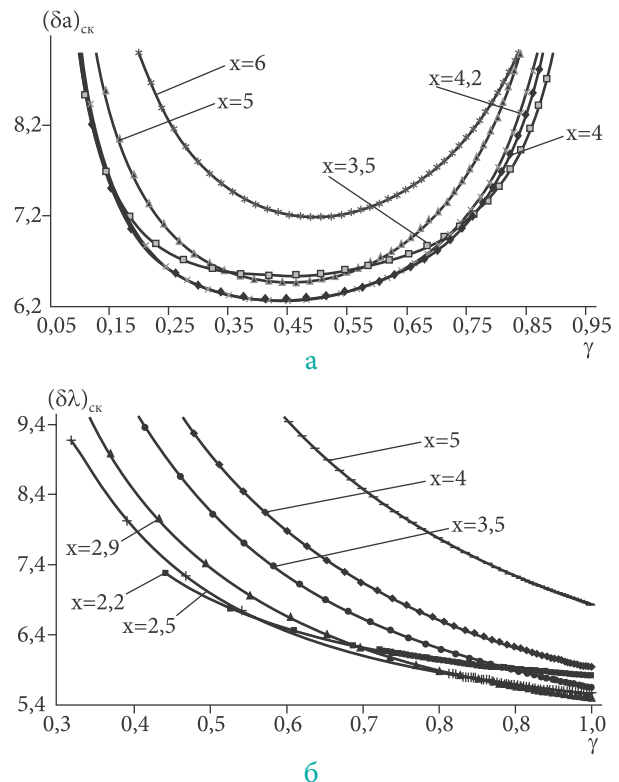


Рис. 2. Зависимости среднеквадратичных относительных погрешностей $(\delta a)_{\text{СК}}$, $(\delta \lambda)_{\text{СК}}$ от безразмерного параметра γ при различных значениях расстояния x от места действия плоского импульсного источника теплоты до плоскости, в которой размещена термопара, измеряющая разность температур $[T(x, \tau') - T_0]$: а – $(\delta a)_{\text{СК}}$; б – $(\delta \lambda)_{\text{СК}}$

Отметим, что при измерении теплофизических свойств исследуемого материала, коэффициент температуропроводности a и теплопроводность λ которого отличаются от заданных (в исходных данных рассмотренных выше расчетов), следует поступить следующим образом:

- путем проведения предварительных измерений надо определить ориентировочные значения коэффициента температуропроводности $a_{\text{оп}}$ и теплопроводности $\lambda_{\text{оп}}$ исследуемого материала;
- действуя по аналогии из изложенным выше в данной статье, надо осуществить расчеты (при найденных значениях $a_{\text{оп}}$ и $\lambda_{\text{оп}}$) с целью определения (уточнения) оптимальных значений параметра $\gamma_{\text{опт}}$ и конструкционных размеров $x_{\text{опт}}^a$ и $x_{\text{опт}}^\lambda$ средней пластины, применяемой для измерения коэффициента температуропроводности a и теплопроводности λ ;
- изготовить образцы с двумя средними пластинами с толщиной $x_{\text{опт}}^a$ и $x_{\text{опт}}^\lambda$, либо с одной средней пластиной с толщиной $x_{\text{опт}} = (x_{\text{опт}}^a + x_{\text{опт}}^\lambda)/2$;
- путем проведения серии экспериментов (с изготовленными образцами) осуществить измерения и последующую обработку полученных дан-

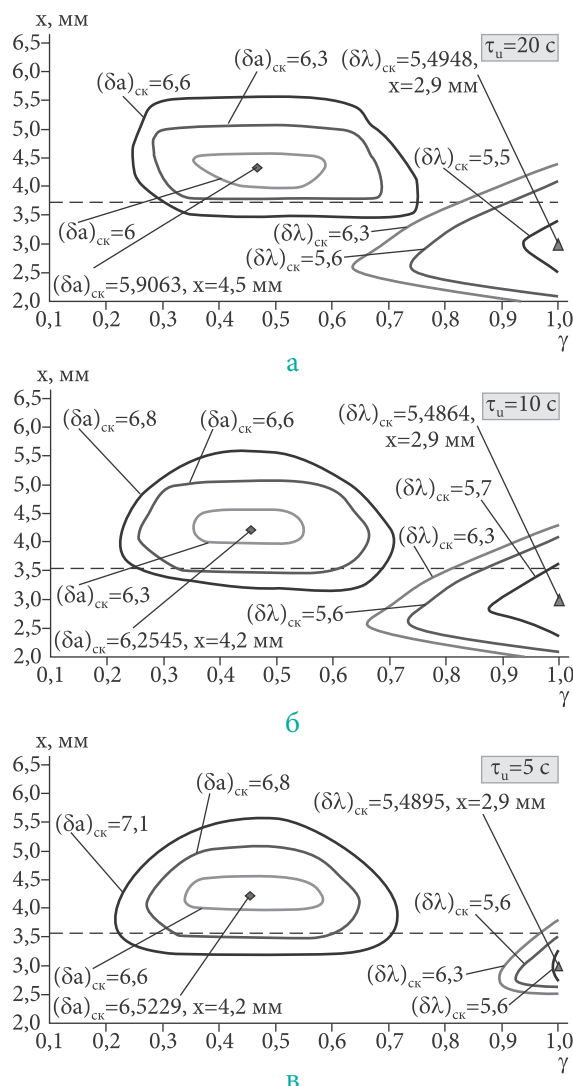


Рис. 3. Линии равных уровней среднеквадратичных относительных погрешностей $(\delta a)_{ck}$, $(\delta \lambda)_{ck}$ построенных при трех значениях длительности τ_u теплового импульса: а – $\tau_u = 20$ с; б – $\tau_u = 10$ с; в – $\tau_u = 5$ с

ных и, в результате, получить значения искомых коэффициента температуропроводности a и теплопроводности λ исследуемого материала.

Заключение

Предложенный в данной статье подход к выбору оптимального значения безразмерного параметра γ и рационального конструкционного размера x средней пластины образца исследуемого материала обеспечивает существенное повышение точности измерений искомых значений коэффициента температуропроводности a и теплопроводности λ .

Литература

1. Пономарев С.В. и др. Теоретические и практические основы теплофизических измере-

ний: монография / Под ред. С.В. Пономарева. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. – 408 с.

2. Платунов Е.С. Теплофизические измерения: Учебн. пособие: Под ред. Е.С. Платунова / Е.С. Платунов, И.В. Баранов, С.Е. Буравой, В.В. Куренин – СПб.: СПбГУНиПТ, 2010. – 738 с.

3. Гуров А.В., Пономарев С.В. Анализ источников погрешностей измерения теплофизических свойств твердых теплоизоляционных материалов методом плоского «мгновенного» источника теплоты // Вопросы современной науки и практики: Ун-т им. В.И. Вернадского. 2013. № 1 (45). С. 273-282.

4. Гуров А.В. Экспериментальная установка для измерения теплофизических свойств теплоизоляционных материалов методом плоского «мгновенного» источника теплоты // Метрология. 2013. № 4. С. 16-24.

5. Гуров А.В., Пономарев С.В. Измерение теплофизических свойств теплоизоляционных материалов методом плоского «мгновенного» источника теплоты: монография. Тамбов: Изд-во ФГБОУ ВПО «ТГТУ», 2013. – 100 с.

6. Корн Г. Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров. М.: Наука, 1973. – 832 с.

7. Лыков А.В. Теория теплопроводности. М.: Высшая школа, 1967. – 600 с.

8. Платунов Е.С. и др. Теплофизические измерения и приборы / Под ред. Е.С. Платунова. Л.: Машиностроение, 1986. – 256 с.

9. Шашков А.Г. и др. Методы определения теплопроводности и температуропроводности / Под ред. А.В. Лыкова. М.: Энергия, 1973. – 336 с.

10. Гуров А.В. и др. Выбор оптимальных условий измерения теплофизических свойств веществ методом плоского мгновенного источника тепла / А.В. Гуров, Г.А. Соседов, С.В. Пономарев // Измерительная техника. 2012. № 10. С. 47–49. Gurov A. V. et al. The choice of the optimum conditions for measuring the thermal properties of materials by the plane «instantaneous» heat source method // Measurement Techniques. 2012. V. 55. N. 10. P. 1187–1192.

11. Пономарев С.В., Егоров М.В., Любимова Д.А. Математическое моделирование погрешностей измерения теплофизических свойств теплоизоляционных материалов методом плоского «мгновенного» источника теплоты // Метрология. 2014. № 9. С. 23-35.

12. Зайдель А.Н. Ошибки измерений физических величин. Л.: Наука, 1974. – 108 с.

13. Мочалин С.Н., Пономарев С.В. Измерение характеристик влагопереноса тонколистовых капиллярно-пористых материалов методом «мгновенного» источника влаги: М.: «Спектр», 2010. – 100 с.