

## АЛГОРИТМ ОБРАБОТКИ БОЛЬШОГО ЧИСЛА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ ПРИ ИЗМЕРЕНИИ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ МЕТОДОМ ПЛОСКОГО ИМПУЛЬСНОГО ИСТОЧНИКА ТЕПЛОТЫ

С. В. Пономарев, С. С. Баранов

*Кафедра «Мехатроника и технологические измерения»,  
svropom@yahoo.com; ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Россия*

**Ключевые слова:** измерение; коэффициент температуропроводности; минимизация; обработка данных; оптимизация; относительные погрешности; теплопроводность.

**Аннотация:** Выполнено математическое моделирование процесса теплопереноса в образце материала методом плоского импульсного источника теплоты. Предложена методика обработки информации об изменении во времени разностей температур, зарегистрированных в процессе эксперимента. Разности температур имеют вид элементов массива и соответствуют определенным значениям моментов времени. Применение методики позволяет уменьшить погрешности измерений теплофизических характеристик материала.

---

### Введение

В условиях динамично развивающихся технологий и создания новых материалов актуально изучение их теплофизических свойств (ТФС). В последнее десятилетие достаточно активно проводятся исследования, посвященные разработке и модернизации новых методик применения методов «мгновенных» и(или) импульсных источников теплоты или влаги [1 – 9]. Решения, приведенные в работе [10], а также обзор [11] численно-аналитических и экспериментальных методов определения ТФС материалов свидетельствуют о том, что основным подходом к получению знаний о ТФС новых веществ и материалов по-прежнему остается экспериментальное измерение этих свойств с последующей обработкой полученных данных по соответствующим алгоритмам в составе измерительных систем [12, 13].

При использовании многих известных методов (в том числе и методов линейного или плоского импульсных источников теплоты) экспериментального определения ТФС веществ и материалов в процессе обработки измерительной информации обычно используют ограниченный объем экспериментальных данных. Довольно часто на практике при вычислении искомого значения ТФС из большого по объему массива полученных экспериментальных исходных данных выделяется и используется единственный элемент массива [1 – 3, 5, 8, 9], соответствующий так называемым «оптимальным условиям» измерения и обработки информации.

*Цель статьи* – выработка рекомендаций по использованию большего объема первичной информации, полученной в процессе проведения эксперимента при измерении ТФС теплоизоляционных материалов методом плоского импульсного

источника теплоты. Предлагаемый в статье подход позволяет повысить точность определения искомым ТФС за счет снижения влияния случайных погрешностей, возникающих при измерении непосредственно определяемых в ходе эксперимента значений физических величин (разностей температур, электрической мощности, геометрических размеров и т.п.).

### Физическая модель измерительного устройства

Физическая модель измерительного устройства представляет собой ячейку [1 – 3, 5, 8, 9], в которую помещают образец, состоящий из трех пластин: нижней, средней и верхней. Наиболее высокие требования предъявляются к точности изготовления [1, 8, 9]:

- средней пластины заданной толщины  $x$ , верхняя и нижняя грани которой должны быть выполнены строго параллельно друг другу и тщательно отшлифованы;

- верхняя грань нижней пластины и нижняя грань верхней пластины также должны быть тщательно отшлифованы в целях снижения теплового сопротивления в местах их контакта с нижней и верхней гранями средней пластины.

Между нижней и средней пластинами обычно размещают малоинерционный плоский нагреватель, а между средней и верхней пластинами устанавливают первичный измерительный преобразователь температуры, например, термопару. Конструкции аналогичных измерительных устройств подробнее рассмотрены в [1 – 5, 8, 9].

### Математическая модель температурного поля

Математическая модель температурного поля  $T(x, \tau)$  в плоском образце (в случае использования импульсного плоского источника теплоты) может быть записана в виде [5, 7 – 9]:

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

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

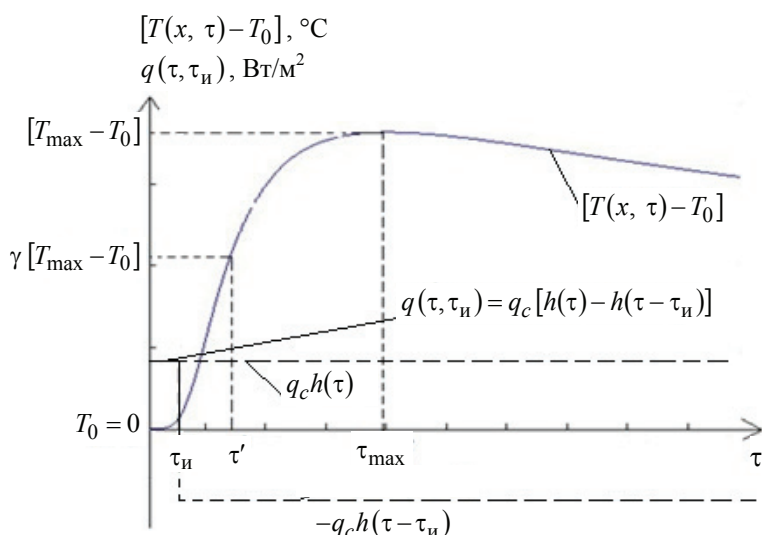
$$-\lambda \frac{\partial T(0, \tau)}{\partial x} = q(\tau, \tau_n) = q_c [h(\tau) - h(\tau - \tau_n)]; \quad (3)$$

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

где  $T(x, \tau)$  – температура исследуемого образца в плоскости с координатой  $x$  в момент времени  $\tau$ , отсчитываемый с момента начала активной стадии эксперимента, °С;  $a = \lambda / c\rho$  – коэффициент температуропроводности, м<sup>2</sup>/с;  $c$  – удельная теплоемкость, Дж/(кг·°С);  $\rho$  – плотность исследуемого материала, кг/м<sup>3</sup>;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·°С);  $q(\tau, \tau_n)$  – импульсный плоский источник теплоты, Вт/м<sup>2</sup>;  $q_c$  – тепловой поток, подводимый к образцу через поверхность  $x = 0$  в течение промежутка времени  $0 < \tau \leq \tau_n$ , Вт/м<sup>2</sup>;  $h(\tau)$ ,  $h(\tau - \tau_n)$  – единичные асимметричные ступенчатые функции, задаваемые соотношениями [14]:

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

$\tau_n$  – длительность теплового импульса  $q(\tau, \tau_n)$ , с.



**Рис. 1. Изменение во времени  $\tau$  физических величин:**

теплового импульса  $q(\tau, \tau_n) = q_c [h(\tau) - h(\tau - \tau_n)]$ , представляющего собой алгебраическую сумму ступенчатых функций  $q_c h(\tau)$  и  $-q_c h(\tau - \tau_n)$ ; разности температур  $[T(x, \tau) - T_0]$  на расстоянии  $x$  от плоского импульсного источника теплоты

Используемое в математической модели (1) – (4) граничное условия 2-го рода в виде соотношения (3) графически проиллюстрировано на рис. 1.

На основе использования принципа суперпозиции и приведенных в [5] результатов, решение краевой задачи (1) – (4) с учетом граничного условия (3) принимает вид

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

где

$$f(x, \tau, \tau_n, a) = \begin{cases} \sqrt{a\tau} \operatorname{ierfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{a\tau}}\right) & \text{при } 0 < \tau \leq \tau_n; \\ \sqrt{a\tau} \operatorname{ierfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{a\tau}}\right) - \sqrt{a(\tau - \tau_n)} \operatorname{ierfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{a(\tau - \tau_n)}}\right) & \text{при } \tau > \tau_n, \end{cases} \quad (7)$$

$\operatorname{ierfc}(u) = \int_u^\infty \operatorname{erfc}(W) dW = \frac{1}{\sqrt{\pi}} e^{-u^2} - u \operatorname{erfc}(u)$  – специальная функция [5, 7 – 9],

представляющая собой интеграл от функции  $\operatorname{erfc}(W) = 1 - \operatorname{erf}(W)$ ;

$\operatorname{erf}(W) = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \int_0^W e^{-W^2} dW$  – функция ошибок Гаусса [7, 14].

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

$$T(x, \tau) - T_0 = \frac{q_c x}{\lambda} \left[ \frac{\operatorname{ierfc}[U(\tau)]}{U(\tau)} - \frac{\operatorname{ierfc}[U(\tau - \tau_n)]}{U(\tau - \tau_n)} \right], \quad (8)$$

где  $U(\tau) = \frac{x}{2\sqrt{a\tau}}$ ,  $U(\tau - \tau_{и}) = \frac{x}{2\sqrt{a(\tau - \tau_{и})}}$  – безразмерные функции, зависящие

от  $x, \tau, \tau_{и}, a$ , причем  $U(\tau - \tau_{и}) = \frac{x}{2\sqrt{a(\tau - \tau_{и})}} = \frac{x}{2\sqrt{a\tau\left(\frac{\tau - \tau_{и}}{\tau}\right)}} = U(\tau)\sqrt{\frac{\tau}{\tau - \tau_{и}}}$ .

График зависимости (8) также приведен на рис. 1, откуда видно, что рассчитанное по данной формуле изменение разности температур  $[T(x, \tau) - T_0]$  в момент времени  $\tau = \tau_{\max}$  достигает максимального значения  $[T_{\max} - T_0] = [T(x, \tau_{\max}) - T_0]$ , причем этому моменту времени  $\tau = \tau_{\max}$  соответствует определенное значение

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

### Подход к проведению эксперимента и последующая обработка полученных данных

Ранее применявшийся подход к проведению эксперимента и последующей обработке полученных данных при измерении ТФС методом плоского импульсного источника теплоты состоит в следующем [8, 9]:

1) изготавливают образец исследуемого материала в виде трех пластин, между которыми размещают плоский нагреватель и термопару, а затем дожидаются достижения равномерного распределения температурного поля  $T(x, \tau) = T_0 = \text{const}$  внутри образца исследуемого материала;

2) в течение заданного промежутка времени  $0 < \tau \leq \tau_{и}$  на плоский электронагреватель площадью  $S$  подают постоянную мощность  $P$  и по сигналу термопары регистрируют изменение во времени разности температур  $[T(x, \tau) - T_0]$ ;

3) по полученным экспериментальным данным определяют максимальное значение разности температур  $[T_{\max} - T_0] = [T(x, \tau_{\max}) - T_0]$  и значение момента времени  $\tau = \tau'$ , соответствующее заранее заданному оптимальному значению параметра

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

представляющего собой отношение текущего значения разности температур  $[T(x, \tau) - T_0]$ , имеющего место в момент времени  $\tau$ , к максимальному значению  $[T_{\max} - T_0] = [T(x, \tau_{\max}) - T_0]$  разности температур в момент времени  $\tau = \tau_{\max}$ . Ранее в работах [8, 9] определено оптимальное значение  $\gamma = 0,465$  данного параметра;

4) по полученным значениям  $\tau'$ ,  $[T_{\max} - T_0]$  с учетом известных  $x$ ,  $q_c = P/2S$  вычисляют искомые значения коэффициента температуропроводности  $a$  и теплопроводности  $\lambda$  исследуемого материала по формулам, приведенным в [8, 9].

Недостатком ранее применявшегося подхода к обработке экспериментальных данных является то, что из имеющегося достаточно большого массива экспериментальных данных используется фактически только:

- одна точка при вычислении коэффициента температуропроводности;
- вторая точка для вычисления коэффициента теплопроводности.

Предложенный алгоритм обработки экспериментальных данных предусматривает использование практически всего массива экспериментально измеренных значений температур, что обеспечивает снижение величины результирующих погрешностей измерения коэффициента температуропроводности и коэффициента теплопроводности исследуемого материала.

### Алгоритм обработки экспериментальной информации

Разработанный алгоритм базируется на использовании большего количества экспериментальных точек (практически всего массива экспериментально измеренных значений разностей температур  $[T(x, \tau_i) - T_0]$ ). Отметим, что впервые аналогичный подход изложен в статье [15]. В процессе эксперимента (при измеренном или известном расстоянии  $x$  между линейным нагревателем и термопарой, а также при измеренном или заданном значении теплового потока  $q_c = P/2S$ ) регистрируют элементы массива в виде экспериментально измеренных в моменты времени  $\tau_i$  значений разностей температур  $T_3(\tau_i) = [T(x, \tau_i) - T_0]_3$ .

Далее подбирают наилучшие пары искомым значений коэффициентов тепло- и температуропроводности  $\lambda_x, a_x$ , при которых вычисленные по формуле (8) для тех же значений координаты  $x$ , теплового потока  $q_c = P/2S$  и моментов времени  $\tau_i, i = 1, 2, \dots, N$ , расчетные значения разностей температур

$$T_p(a_x, \lambda_x, x, \tau_i) = [T(x, \tau_i) - T_0]_p \quad (9)$$

наиболее близки к экспериментально измеренным значениям  $T_3(\tau_i)$ .

При практическом решении данной задачи в процессе перебора значений  $\lambda_x, a_x$  с небольшим шагом в заранее заданных диапазонах  $a_{\min} < a_x < a_{\max}$ ,  $\lambda_{\min} < \lambda_x < \lambda_{\max}$  осуществляют вычисление и минимизацию целевой функции в виде суммы квадратов отклонений

$$F(a_x, \lambda_x) = \sum_{i=1}^N [T_p(a_x, \lambda_x, x, \tau_i) - T_3(\tau_i)]^2 = \min. \quad (10)$$

В качестве искомым значений ТФС принимается та пара значений  $\lambda_x, a_x$ , при которых достигается минимум целевой функции (10).

При указании диапазонов изменения ТФС необходимо учитывать предварительную информацию об ожидаемых значениях  $\lambda_x, a_x$ , полученных, например, численно-аналитическими методами [11] или приблизительно оцененные на менее точном измерительном устройстве.

### Подтверждение работоспособности алгоритма обработки экспериментальных данных с применением численного математического моделирования

Процедура численного моделирования процесса обработки экспериментальных данных включает следующие этапы:

1) задание пары значений ТФС  $\lambda_T, a_T$ , соответствующих определенному материалу и принимаемых в качестве точных (при расчетах использованы известные значения ТФС полиметилметакрилата);

2) при заданных точных значениях ТФС вычисление (с постоянным шагом  $\Delta t$  во времени) значений разностей температур  $T_3(x, \tau_i)$  по формуле (8) с после-

дующей регистрацией элементов массива этих значений разностей температур и регистрацией массива  $T_3(x, \tau_i)$ ,  $i = 1, 2, \dots, N$ , соответствующих моментов времени  $\tau_i$ ;

3) внесение случайных относительных погрешностей в элементы массива  $T(x, \tau_i) - T_0$ . Для внесения в зарегистрированные значения элементов массива  $T(x, \tau_i) - T_0$  случайных относительных погрешностей порядка  $100/A$  процентов, где  $A = 50$ , то есть в пределах 2 %, каждый элемент массива умножали на число  $A$ , затем (с использованием функции округления чисел) отбрасывали дробные части полученных элементов массива и делили результаты округления на число  $A$ . В результате получали закругленные (по отношению к первоначально рассчитанным исходным (точным) значениям  $T(x, \tau_i) - T_0$ ) значения  $[T(x, \tau_i) - T_0]^{FP}$  элементов массива, в которые внесены случайные относительные погрешности порядка 2 %;

4) полученные закругленные значения элементов массива использовали при численном моделировании в качестве экспериментально измеренных значений, то есть считали, что

$$T_3(\tau_i) = [T(x, \tau_i) - T_0]^{FP}; \quad (11)$$

5) в процессе перебора значений  $\lambda_x$ ,  $a_x$  с небольшим шагом в заранее заданных диапазонах  $a_{\min} < a_x < a_{\max}$ ,  $\lambda_{\min} < \lambda_x < \lambda_{\max}$  вычисляли и минимизировали целевую функцию (10), где  $T_p(a_x, \lambda_x, x, \tau_i)$  (см. формулу (9)) – рассчитанные по формуле (8) разности температур, соответствующие моментам времени  $\tau_i$ ,  $i = 1, 2, \dots, N$ , при заданных (на каждом этапе расчетов) значениях ТФС  $\lambda_x$ ,  $a_x$ ;  $T_3(x, \tau_i)$  определяется формулой (11) и представляет псевдоэкспериментальные значения элементов массива, соответствующие моментам времени  $\tau_i$ . Затем находили искомую пару значений ТФС, при которых достигается минимум целевой функции (10).

#### **Нахождение числа экспериментальных точек $N$ , обеспечивающего требуемую точность определения искомых ТФС в процессе обработки данных**

Вначале вычисляли относительные погрешности (неопределенности расчета искомых величин)  $\delta\lambda_p$ ,  $\delta a_p$  полученных значений коэффициентов  $\lambda_x$ ,  $a_x$ :

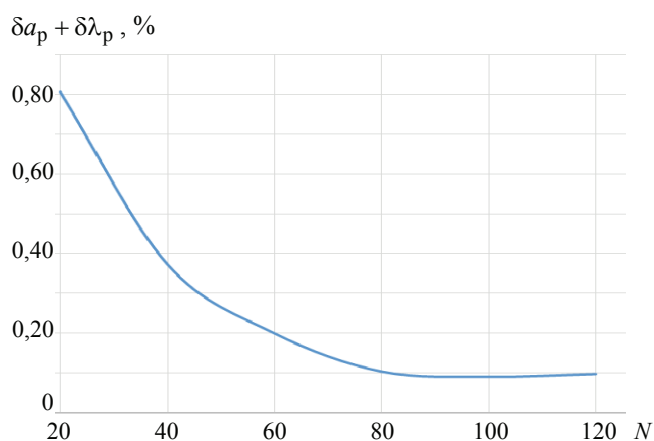
$$\delta\lambda_p = (\lambda_x - \lambda_T) / \lambda_T;$$

$$\delta a_p = (a_x - a_T) / a_T,$$

а затем находили сумму данных погрешностей  $\delta\lambda_p + \delta a_p$ .

При этом значения искомых величин рассчитывали при числе экспериментальных точек  $N = 20, 40, 60, 80, 100, 120$ .

На рисунке 2 приведена зависимость суммарной погрешности  $\delta\lambda_p + \delta a_p$  от числа  $N$  экспериментальных точек. Очевидно, что при увеличении числа используемых экспериментальных точек сумма двух погрешностей  $\delta\lambda_p + \delta a_p$  уменьшается, причем, если при  $N = 20$  суммарная относительная погрешность алгоритма обработки данных  $\delta\lambda_p + \delta a_p \approx 0,8$  %, то при  $N = 50$  и более погрешность алгоритма обработки не превышает величины 0,25 %.



**Рис. 2.** Зависимость суммарной погрешности  $\delta a_p + \delta \lambda_p$  от числа экспериментальных точек  $N$

### Заключение

Рассмотренный алгоритм обработки экспериментальной информации обеспечивает повышение точности определения искомым ТФС за счет уменьшения влияния случайных погрешностей измерения непосредственно определяемых в ходе эксперимента физических величин (разностей температур).

Разработанный подход, основанный на использовании компьютерного численного математического моделирования процесса измерения теплофизических свойств методом плоского импульсного источника теплоты, позволяет еще на этапе проектирования (то есть до начала изготовления экспериментальной установки) существенно снизить затраты времени, материальных и финансовых ресурсов на выполнение научно-исследовательских работ по оценке погрешностей измерения ТФС материалов по сравнению со случаем экспериментального проведения работ после изготовления опытного образца (макета) измерительного устройства.

### Список литературы

1. Теоретические и практические основы теплофизических измерений : монография / С. В. Пономарев, С. В. Мищенко, А. Г. Дивин, В. А. Вертоградский ; под редакцией С. В. Пономарева. – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2008. – 408 с.
2. Теплофизические измерения : учеб. пособие / Е. С. Платунов, И. В. Баранов, С. Е. Буравой, В. В. Курепин ; под ред. Е. С. Платунова. – СПб. : СПбГУНиПТ, 2010. – 738 с.
3. Теплофизические измерения и приборы : учеб. пособие / Е. С. Платунов, С. Е. Буравой, В. В. Курепин, Г.С. Петров ; под ред. Е. С. Платунова. – Л. : Машиностроение, 1986. – 256 с.
4. Годовский, Ю. К. Теплофизические методы исследования полимеров / Ю. К. Годовский. – М. : Химия, 1976. – 216 с.
5. Методы определения теплопроводности и температуропроводности / А. Г. Шашков, Г. М. Волохов, Т. Н. Абраменко, В. П. Козлов ; под ред. А. В. Лыкова. – М. : Энергия, 1973. – 336 с.
6. Харламов, А. Г. Измерение теплопроводности твердых тел / А. Г. Харламов. – М. : Атомиздат, 1973. – 152 с.
7. Лыков, А. В. Теория теплопроводности : учеб. пособие / А. В. Лыков. – М. : Высшая школа, 1967. – 600 с.

8. Пономарев, С. В. Минимизация погрешностей измерений коэффициентов теплопроводности и температуропроводности теплоизоляционных материалов методом плоского импульсного источника теплоты / С. В. Пономарев, Е. В. Буланов, В. О. Буланова, А. Г. Дивин // Измерительная техника. – 2018. – № 12. – С. 43 – 46. doi: 10.32446/0368-1025it.2018-12-43-46
9. Буланов, Е. В. Повышение точности измерения теплофизических свойств теплоизоляционных материалов с применением метода плоского импульсного источника теплоты: дис. ... канд. техн. наук : 05.11.13 / Буланов Евгений Владимирович. – Тамбов, 2019. – 122 с.
10. Дмитриев, О. С. Численно-аналитическое решение нелинейной коэффициентной обратной задачи теплопроводности / О. С. Дмитриев, А. А. Живенкова // Инженерно-физический журнал. – 2018. – Т. 91, № 6. – С. 1426 – 1437. doi: 10.1007/s10891-018-1869-x
11. Пономарев, С. Обзор экспериментальных и численно-аналитических методов определения теплофизических характеристик гетерогенных материалов растительного происхождения / С. Пономарев, А. Дивин, В. Сычев ; под ред. С. Пономарева. – Saarbrücken : Lambert Academic Publishing, 2017. – 80 с.
12. Живенкова, А. А. Алгоритмическое и программное обеспечение информационно-измерительной системы исследования теплофизических характеристик полимерных композитов в процессе отверждения / А. А. Живенкова, О. С. Дмитриев // Вопросы современной науки и практики. Университет им. В. И. Вернадского. – 2014. – № 4(54). – С. 212 – 217.
13. Дмитриев, О. С. Интеллектуальная информационно-измерительная система для определения теплофизических характеристик полимерных композитов / О. С. Дмитриев, А. А. Живенкова, А. О. Дмитриев. // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2013. – Т. 19, № 1. – С. 73 – 83.
14. Корн, Г. Справочник по математике для научных работников и инженеров / Г. Корн, Т. Корн. – М. : Наука, 1973. – 832 с.
15. Определение теплофизических свойств материалов методом линейного импульсного источника теплоты с обработкой большого числа экспериментальных данных / С. В. Пономарев, Е. В. Буланов, В. О. Буланова, А. Г. Дивин, С. С. С. Аль-Бусаиди // Метрология. – 2019. – № 3. – С. 56 – 66.

---

## An Algorithm for Processing a Large Number of Experimental Data while Measuring Thermal Physical Properties of Materials by the Flat Pulse Heat Source Method

S. V. Ponomarev, S. S. Baranov

*Department of Mechatronics and Technological Measurements,  
svponom@yahoo.com; TSTU, Tambov, Russia*

**Keywords:** measurement; thermal diffusivity coefficient; minimization; data processing; optimization; relative errors; thermal conductivity.

**Abstract:** Mathematical modeling of the heat transfer process in a material sample using the method of a flat pulsed heat source was performed. A technique is proposed for processing information about changes in temperature differences over time recorded during the experiment. Temperature differences have the form of array elements and correspond to certain values of moments in time. The use of the technique makes it possible to reduce the measurement errors of the thermophysical characteristics of the material.



## References

1. Ponomarev S.V. (Ed.), Mishchenko S.V., Divin A.G., Vertogradskiy V.A. *Teoreticheskiye i prakticheskiye osnovy teplofizicheskikh izmereniy: monografiya* [Theoretical and practical foundations of thermophysical measurements: monograph], Moscow: FIZMATLIT, 2008, 408 p. (In Russ.)
2. Platunov Ye.S. (Ed.), Baranov I.V., Buravoy S.Ye., Kurepin V.V. *Teplofizicheskiye izmereniya: ucheb. posobiye* [Thermophysical measurements: textbook], St. Petersburg: SPbGUNIPT, 2010, 738 p. (In Russ.)
3. Platunov Ye.S. (Ed.), Buravoy S.Ye., Kurepin V.V., Petrov G.S. *Teplofizicheskiye izmereniya i pribory: ucheb. posobiye* [Thermophysical measurements and instruments: textbook], Leningrad: Mashinostroyeniye, 1986, 256 p. (In Russ.)
4. Godovskiy Yu.K. *Teplofizicheskiye metody issledovaniya polimerov* [Thermophysical methods for studying polymers], Moscow: Khimiya, 1976, 216 p. (In Russ.)
5. Shashkov A.G., Volokhov G.M., Abramenko T.N., Kozlov V.P.; Lykov A.V. (Ed.). *Metody opredeleniya teploprovodnosti i temperaturoprovodnosti* [Methods for determining thermal conductivity and temperature diffusivity], Moscow: Energiya, 1973, 336 p. (In Russ.)
6. Kharlamov A.G. *Izmereniye teploprovodnosti tverdykh tel* [Measuring the thermal conductivity of solids], Moscow: Atomizdat, 1973, 152 p. (In Russ.)
7. Lykov A.V. *Teoriya teploprovodnosti: ucheb. posobiye* [Theory of thermal conductivity: textbook], Moscow: Vysshaya shkola, 1967, 600 p. (In Russ.)
8. Ponomarev S.V., Bulanov Ye.V., Bulanova V.O., Divin A.G. [Minimization of errors in measuring the coefficients of thermal conductivity and thermal diffusivity of thermal insulation materials using the method of a flat pulsed heat source], *Izmeritel'naya tekhnika* [Measuring technology], 2018, no. 12, pp. 43-46. doi: 10.32446/0368-1025it.2018-12-43-46 (In Russ., abstract in Eng.)
9. Bulanov Ye.V. *PhD Dissertation (Engineering)*, Tambov, 2019, 122 p. (In Russ.)
10. Dmitriyev O.S., Zhivenkova A.A. [Numerical and analytical solution of the nonlinear coefficient inverse problem of heat conduction], *Inzhenerno-fizicheskiy zhurnal* [Engineering and Physical Journal], 2018, vol. 91, no. 6, pp. 1426-1437. doi: 10.1007/s10891-018-1869-x (In Russ., abstract in Eng.)
11. Ponomarev S. (Ed.), Divin A., Sychev V. *Obzor eksperimental'nykh i chislenno-analiticheskikh metodov opredeleniya teplofizicheskikh kharakteristik geterogennykh materialov rastitel'nogo proiskhozhdeniya* [Review of experimental and numerical-analytical methods for determining the thermophysical characteristics of heterogeneous materials of plant origin], Saarbrücken: Lambert Academic Publishing, 2017, 80 p. (In Russ.)
12. Zhivenkova A.A., Dmitriyev O.S. [Algorithmic and software support for an information-measuring system for studying the thermophysical characteristics of polymer composites during the curing process], *Voprosy sovremennoy nauki i praktiki. Universitet im. V.I. Vernadskogo* [Problems of Contemporary Science and Practice. Vernadsky University], 2014, no. 4(54), pp. 212-217. (In Russ., abstract in Eng.)
13. Dmitriyev O.S., Zhivenkova A.A., Dmitriyev A.O. [Intelligent information-measuring system for determining the thermophysical characteristics of polymer composites], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2013, vol. 19, no. 1, pp. 73-83. (In Russ., abstract in Eng.)
14. Korn G., Korn T. *Spravochnik po matematike dlya nauchnykh rabotnikov i inzhenerov* [Handbook of mathematics for scientists and engineers], Moscow: Nauka, 1973, 832 p. (In Russ.)
15. Ponomarev S.V., Bulanov Ye.V., Bulanova V.O., Divin A.G., Al'-Busaidi S.S.S. [Determination of thermophysical properties of materials by the method of a linear pulsed heat source with processing of a large number of experimental data], *Metrologiya* [Metrology], 2019, no. 3, pp. 56-66. (In Russ., abstract in Eng.)

## **Algorithmus zur Verarbeitung einer großen Anzahl experimenteller Daten zur Messung thermophysikalischer Eigenschaften von Materialien mit der Methode der flächenhaften Pulswärmequelle**

**Zusammenfassung:** Es ist eine mathematische Modellierung des Wärmeübertragungsprozesses in einer Materialprobe mit der Methode der flachen gepulsten Wärmequelle durchgeführt. Es ist eine Technik zur Verarbeitung von Informationen über zeitliche Änderungen der Temperaturunterschiede vorgeschlagen, die während des Experiments aufgezeichnet worden sind. Temperaturunterschiede haben die Form von Array-Elementen und entsprechen bestimmten Werten von Zeitpunkten. Der Einsatz der Technik ermöglicht es, die Messfehler der thermophysikalischen Eigenschaften des Materials zu reduzieren.

---

## **Algorithme du traitement d'un grand nombre de données expérimentales lors de la mesure des propriétés thermiques des matériaux par la méthode de la source de chaleur pulsée plate**

**Résumé:** Est réalisée une simulation mathématique du processus de transfert de chaleur dans un échantillon de matériau par la méthode de la source d'impulsion plate. Est proposée une méthode de traitement des informations sur un changement dans le temps des différences des température enregistrées au cours de l'expérience. Les différences de température sont des éléments d'un tableau et correspondent à des valeurs de moments spécifiques. L'utilisation de la technique permet de réduire les erreurs de mesure des caractéristiques thermiques du matériau.

---

**Авторы:** *Пономарев Сергей Васильевич* – доктор технических наук, профессор кафедры «Мехатроника и технологические измерения»; *Баранов Сергей Сергеевич* – магистрант; ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Россия.