

НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЬ ИЗМЕРЕНИЯ НЕСТАЦИОНАРНОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ПОВЕРХНОСТИ МАССИВНЫХ ТЕЛ

Н. В. ПИЛИПЕНКО

*Университет ИТМО, 197101, Санкт-Петербург, Россия
E-mail: pilipenko38@mail.ru*

Приводится анализ методических неопределенностей измерения нестационарной температуры поверхности массивных тел с помощью различных контактных преобразователей температуры. Рассматриваются два метода восстановления действительной температуры объекта: с использованием преобразования Лапласа, которое приводит к операционному методу интегрирования дифференциальных уравнений, и с использованием дифференциально-разностных моделей теплопереноса в системе термопреобразователь — объект исследования, которые приводят к численно-аналитическому методу вычислений.

Ключевые слова: температура, тепловой поток, измерительный преобразователь температуры, неопределенность измерения, дифференциально-разные модели

Контактные методы измерения температуры различных объектов основаны на том, что чувствительные элементы измерителя температуры находятся в условиях термодинамического равновесия с исследуемым объектом. Только в таком состоянии температура чувствительного элемента равна температуре объекта в исследуемой зоне. Несоблюдение исходного принципа контактной термометрии, характерное для реальных условий измерений, приводит к возникновению методической неопределенности [1, 2].

Измерительный преобразователь температуры (ИПТ) (как бы физически миниатюрен он ни был) является чужеродным телом, в той или иной степени возмущающим поле температуры исследуемого объекта. Учесть это возмущение в общем случае можно после изучения всего комплекса явлений теплообмена, происшедших до и после монтажа измерителя на исследуемом объекте. Определение неопределенности измерения температуры является, таким образом, частью общей проблемы исследования теплообмена системы тел, находящихся в контакте с окружающими телами и средами.

Формулировке задачи теплообмена должен предшествовать качественный анализ, имеющий целью: а) определение исходного теплового состояния исследуемого объекта; б) разработку тепловой и математической моделей измерителя температуры в соответствии с предполагаемыми условиями его размещения на объекте; в) выявление и учет тепловых воздействий (режимных факторов), определяющих возникновение методической неопределенности [1—3].

В настоящей статье приводится анализ методических неопределенностей измерения нестационарной температуры поверхности массивных тел с помощью различных контактных преобразователей температуры. Под массивным телом, как это показано в работах [1, 2, гл. 10], обычно понимается тело, распространение температуры в котором описывается моделью „полупространства“. При этом рассматриваются два метода восстановления действительной температуры объекта: первый — с использованием преобразования Лапласа, которое приводит к операционному методу интегрирования дифференциальных уравнений; второй — с использованием дифференциально-разностных моделей (ДРМ) теплопереноса в системе

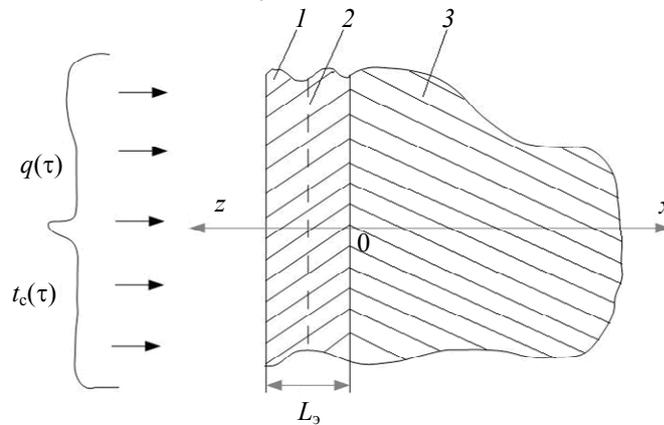
термопреобразователь — объект исследования (тело), которые приводят к численно-аналитическому методу вычислений. Рассмотрим кратко особенности этих методов.

При реализации метода с использованием преобразования Лапласа [1, 2] для измерения нестационарной температуры поверхности тела, как правило, используется ИПТ в виде пластины, толщина которой значительно меньше ее длины и ширины, а распределение температуры в ней можно принять одномерным. Таким образом, реальное тело можно заменить полупространством, а ИПТ — неограниченной пластиной заданной толщины L_3 . Между ИПТ и телом может существовать заданное контактное тепловое сопротивление.

Анализ систематических неопределенностей измерения нестационарной температуры может быть проведен на основе двух задач:

- теплообмена исследуемого тела с окружающей его средой;
- теплообмена системы ИПТ — тело с той же средой.

Постановку задач можно проиллюстрировать схемой, приведенной на рисунке, где 1 — ИПТ, 2 — чувствительный элемент ИПТ, 3 — массивное тело.



Поверхности тела и системы ИПТ — тело подвержены воздействиям внешнего теплового потока $q(\tau)$ и температуры $t_c(\tau)$ внешней среды. Коэффициенты теплоотдачи между средой и телом, средой и наружной поверхностью ИПТ соответственно равны α_0 и α_3 . Степени черноты поверхности тела и ИПТ по отношению к потоку внешнего излучения $q(\tau)$ составляют A_0 и A_3 . Теплофизические свойства тела и ИПТ характеризуются значениями теплопроводности, температуропроводности, удельной теплоемкости и плотности — $\lambda_0, \alpha_0, c_0, \gamma_0$ и $\lambda_3, \alpha_3, c_3, \gamma_3$ соответственно. Начальное распределение температуры в объекте и системе ИПТ — объект равномерное, начальная температура принимается равной нулю или выбирается в качестве уровня отсчета.

Температурное поле в свободном теле и системе ИПТ — тело характеризуется зависимостями $t_0(x, \tau)$, $t_3(z, \tau)$ и $t(x, \tau)$. Взаимосвязь между функциями $t_0(x, \tau)$ и $t_3(z, \tau)$ может быть установлена после отдельного решения задач теплопроводности свободного тела и системы ИПТ — тело. Результаты решения для лапласовских изображений $T_0(0, s)$ и $T_3(Z, s)$ температуры $t_0(x, \tau)$ и $t_3(z, \tau)$ имеют следующий вид [1, 2]:

$$T_0(0, s) = Y_0(s) Z_0(s) = Y_0(s) \left[T_c(s) + \frac{A_0}{\alpha_0} Q(s) \right]; \quad (1)$$

$$Y_0(s) = \frac{1}{1 + \frac{\lambda_0}{\alpha_0} \sqrt{\frac{s}{\alpha_0}}} = \frac{1}{1 + \frac{\eta}{\xi_0} \beta_3}; \quad (2)$$

$$T_3(Z, s) = Y_3(s) Z_3(s) = Y_3(s) \left[T_c(s) + \frac{A_3}{\alpha_3} Q(s) \right], \quad (3)$$

$$Y_3(Z, s) = \frac{\left(1 + \frac{\eta}{\xi_0} \beta_3\right) \operatorname{ch}(\beta_3 Z) + \eta \operatorname{sh}(\beta_3 Z)}{\left[1 + \eta \left(\frac{1}{\xi_3} + \frac{1}{\xi_k}\right) \beta_3\right] \operatorname{ch} \beta_3 + \left(\eta + \frac{1}{\xi_3} \beta_3 + \frac{\eta}{\xi_3 \xi_k} \beta_3^2\right) \operatorname{sh} \beta_3}. \quad (4)$$

В выражениях (1)—(4) $T_c(s)$ и $Q(s)$ — есть изображения внешних воздействий $t_c(\tau)$ и $q(\tau)$; передаточные функции $Y_0(s)$ и $Y_3(s)$ содержат следующие параметры:

$$\eta = \sqrt{\frac{\lambda_0 c_0 \gamma_0}{\lambda_3 c_3 \gamma_3}}; \quad \beta_3 = K_3 \sqrt{s}; \quad K_3 = \frac{L_3}{\sqrt{a_3}}; \quad (5)$$

$$\xi_0 = \alpha_0 L_3 / \lambda_3; \quad \xi_3 = \alpha_3 L_3 / \lambda_3; \quad \xi_k = \alpha_k L_3 / \lambda_3; \quad Z = z / L_3, \quad (6)$$

где α_k — коэффициент теплоотдачи в зоне контакта ИПТ и тела.

Выражения (1)—(6) служат основой для последующего сравнения действительной $t_0(0, \tau)$ и измеренной $t_3(z, \tau)$ температуры при заданных воздействиях $t_c(\tau)$ и $q(\tau)$, что и позволяет оценивать методические неопределенности измерения температуры [1, 2].

При реализации метода с использованием дифференциально-разностных моделей теплоперенос в одномерной постановке в системе тел преобразователь — объект исследования описывается системой обыкновенных дифференциальных уравнений первого порядка относительно составляющих вектора состояния $\mathbf{T}(\tau)$ [4, 5, 7]:

$$\frac{d}{d\tau} \mathbf{T}(\tau) = F \mathbf{T}(\tau) + G \mathbf{U}(\tau), \quad (7)$$

где F и G — матрицы обратных связей и управления; \mathbf{U} — вектор управления.

Общее решение уравнения (7) имеет вид [2, 3]

$$\mathbf{T}(\tau) = \Phi(\tau, \tau_0) \mathbf{T}(\tau_0) + \int_{\tau_0}^{\tau} \Phi(\tau, \theta) G \mathbf{U}(\theta) d\theta, \quad (8)$$

где $\Phi(\tau, \tau_0)$ — переходная матрица, которая отражает внутренние тепловые связи в системе тел и определяется следующим бесконечным рядом [4, 5]:

$$\Phi(\Delta\tau) = J + F \Delta\tau + \frac{1}{2!} F^2 (\Delta\tau)^2 + \frac{1}{3!} F^3 (\Delta\tau)^3 + \dots + \frac{1}{p!} F^p (\Delta\tau)^p, \quad (9)$$

где J — единичная матрица.

При численных решениях уравнения (7) устанавливается малый временной шаг $\Delta\tau$ и вектор состояния $\mathbf{T}(\tau)$ определяется по зависимости

$$\mathbf{T}_{k+1} = \Phi \mathbf{T}_k + \frac{1}{2} (J + \Phi) G \mathbf{U}_k \Delta\tau, \quad (10)$$

где $\mathbf{T}_k = \mathbf{T}_k(\tau_k)$ и $\mathbf{U}_k = \mathbf{U}_k(\tau_k)$, а $\tau = k \Delta\tau$, $k = 0, 1, 2, \dots$

Полная математическая модель теплоизмерительной системы состоит из модели теплопереноса (7) и модели измерений, которая характеризует неопределенности измерения температуры в выбранных точках объекта и имеет вид [2, 3]: $\mathbf{Y}_k = H \mathbf{T}_k + \mathbf{E}_k$, где \mathbf{Y}_k и \mathbf{E}_k — векторы измерений и их неопределенности, H — матрица измерений.

Достоинством такого представления является возможность применения методов пространства состояния, разработанных в общей теории динамических систем, для анализа динамических характеристик используемых ИПТ, а также для восстановления нестационарных тепловых потоков и уточнения теплофизических свойств материалов путем параметрической идентификации ДРМ.

На кафедре компьютерной теплофизики и энергофизического мониторинга Университета ИТМО в течение ряда лет проводились модельные и натурные исследования по восстановлению нестационарных температур и тепловых потоков и уточнению теплофизических характеристик тел с использованием различных типов ИПТ; разработаны программные комплексы “Heat Stream”, “Heat Identification”, “Sailab” и др. на основе цифрового фильтра Калмана; накоплен обширный экспериментальный материал, что позволяет обоснованно судить о возможностях рассматриваемых методов и оценках неопределенности измерения искомых параметров [4—16].

Сравнительный анализ двух представленных методов — с использованием преобразования Лапласа и параметрической идентификации ДРМ — показал более широкие возможности второго метода, а именно:

— использование взятой из ДРМ матрицы обратных связей, управления и измерений, а также программного пакета MatLab позволяет автоматически получить численные значения и графики изменения всех динамических характеристик ИПТ (переходной, импульсной, амплитудно- и фазочастотной), а также передаточной функции; при этом восстановленные значения искомых параметров (температуры и теплового потока) вычисляются с методической неопределенностью, не превышающей 1 % [5];

— метод позволяет рассматривать модели многосоставных тел практически с любыми граничными условиями, контактными сопротивлениями, а также источниками или стоками энергии внутри объекта [9];

— метод позволяет устанавливать доверительные области измерения искомых параметров и, используя их, разрабатывать основы проектирования различных ИПТ с заранее заданными характеристиками [8].

В качестве иллюстрации рассмотрим результаты восстановления температуры массивного тела двумя методами на примере, приведенном в работах [1, 2, пример 10.2]. Массивное тело 3 (см. рисунок), изготовленное из огнеупорного материала, находится в теплообмене с внешней средой, температура которой изменяется по гармоническому закону $t_c = t_{c_0} + \alpha_c t_c \cos(\omega t)$. Чувствительный элемент 2 запрессован в электроизоляционную основу.

Толщина ИПТ (пластины) $L_3 = 5 \cdot 10^{-5}$ м, теплофизические свойства: $\lambda_3 = 0,25$ Вт/м·К, $c_3 = 1,3 \cdot 10^3$ Дж/кг·К, $\gamma_3 = 1,5 \cdot 10^3$ кг/м³. Теплофизические свойства материала тела: $\lambda_0 = 0,9$ Вт/м·К, $c_0 = 0,9 \cdot 10^3$ Дж/кг·К, $\gamma_0 = 1,9 \cdot 10^3$ кг/м³. Коэффициент теплоотдачи между телом и средой 100 Вт/м²·К, амплитуда колебания температуры среды 100 К. Требуется определить отношение измеренной D_{t_s} и действительной D_{t_0} амплитуд колебаний температуры тела с помощью выбранного ИПТ, если период T колебания температуры среды составляет 10, 1,0 и 0,1 с. Результаты вычислений представлены в таблице.

| T, с | Метод с использованием преобразования Лапласа | Метод с использованием ДРМ |
|------|---|----------------------------|
| | D_{t_s} / D_{t_0} | D_{t_s} / D_{t_0} |
| 10 | 1,01 | 1,01 |
| 1,0 | 1,06 | 1,03 |
| 0,1 | 1,36 | 1,15 |

Как видно из таблицы, измеренные амплитуды колебания температуры тела D_{t_s} превышают действительные значения D_{t_0} на 1, 6 и 36 % при использовании первого метода [1] и на 1, 3 и 15 % — при использовании второго.

В заключение отметим, что неопределенность измерения температуры поверхностей массивных тел существенно возрастает с уменьшением периода колебания температуры окружающей их среды. По результатам измерений с помощью различных ИПТ были восстановлены действительные температуры поверхностей различных объектов. При этом рассматривались случаи произвольного характера изменения температуры при натурных исследованиях, имеющих важное практическое значение, в частности: при восстановлении поверхностной плотности нестационарного теплового потока $q(\tau)$ специальных объектов в гиперзвуковых аэродинамических трубах [14], при прогнозировании времени сохранения несущей способности тоннельных сооружений при пожаре [15], при определении тепловых и структурно-гидродинамических параметров в промышленных псевдоожиженных системах [16].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ярышев Н. А. Теоретические основы измерения нестационарных температур Л.: Энергоиздат, 1990. 256 с.
2. Ярышев Н. А. Научная школа и школа жизни. СПб: СПбГУ ИТМО, 2010. 296 с.
3. Кондратьев Г. М., Дульнев Г. Н., Платунов Е. С., Ярышев Н. А. Прикладная физика. Теплообмен в приборостроении. СПб: СПбГУ ИТМО, 2003. 560с.
4. Пилипенко Н. В. Параметрическая идентификация в нестационарной теплотметрии // Изв. вузов. Приборостроение. 2003. Т. 46, № 8. С. 50—54.
5. Пилипенко Н. В., Гладских Д. А. Решение прямых и обратных задач теплопроводности на основе дифференциальных моделей теплопереноса // Изв. вузов. Приборостроение. 2007. Т. 50, № 3. С. 69—74.
6. Пилипенко Н. В., Зеленская М. Г. Параметрическая идентификация тепловых потоков с помощью теплометров „тонкого диска“ // Измерительная техника. 2006. № 7. С. 46—49.
7. Pilipenko N. Parametrical identification of differential-difference heat transfer models in non-stationary thermal measurements // Heat Transfer Research. 2008. Vol. 39, N 4. P. 311—315.
8. Пилипенко Н. В., Казарцев Я. В. Оптимальное планирование эксперимента при идентификации процессов теплообмена сенсоров теплового потока // Изв. вузов. Приборостроение. 2011. Т. 54, № 5. С. 88—93.
9. Пилипенко Н. В., Кириллов К. В. Определение нестационарных условий теплообмена в энергетических установках // Приборы. 2008. № 9. С. 21—25.
10. Sivakov J. A., Pilipenko N. V. A method of determining nonstationary heat flux and heat conduction using parametric identification // Measurement Techniques. 2011. Vol. 54, N 3. P. 318—323.
11. Pilipenko N. V., Gladskih D. A. Determination of the heat losses of buildings and structures by solving problem // Measurement Techniques. 2014. Vol. 57, N 2. P. 181—186.
12. Пилипенко Н. В. Методические погрешности определения нестационарных условий теплообмена при параметрической идентификации // Измерительная техника. 2007. № 8. С. 54—59.
13. Пилипенко Н. В., Придачин А. С. Неопределенность восстановления тепловых потоков с помощью тепломеров тонкого диска // Измерительная техника. 2016. № 2. С. 32—35.
14. Пилипенко Н. В., Кириллов К. В., Сиваков И. А., Ключка О. В., Павлов А. В. Метод восстановления плотности тепловых потоков на поверхностях объектов в импульсных аэродинамических трубах // Материалы 4-й Всерос. и стран-участниц КООМЕТ конф. по проблемам термометрии „Температура-2011“. СПб: ВНИИМ им. Д. И. Менделеева, 2011. С. 170—171.
15. Сиваков И. А., Пилипенко Н. В. Измерение нестационарного теплового потока для прогнозирования времени сохранения несущей способности тоннельных сооружений при пожаре // Сб. тр. II науч.-практ. конф. „Sensorica-2014“. СПб: Ун-т ИТМО, 2014. С. 106—108.
16. Дульнев Г. Н., Пилипенко Н. В., Ходунков В. П. Теплофизические аспекты процесса псевдоожижения в энергетических установках // Изв. вузов. Приборостроение. 2010. Т. 53, № 3. С. 83—89.

Николай Васильевич Пилипенко — д-р техн. наук, профессор; Университет ИТМО, кафедра компьютерной теплофизики и энергофизического мониторинга;
E-mail: pilipenko38@mail.ru

Рекомендована кафедрой
компьютерной теплофизики
и энергофизического мониторинга

Поступила в редакцию
11.05.16 г.

Ссылка для цитирования: Пилипенко Н. В. Неопределенность измерения нестационарной температуры поверхности массивных тел // Изв. вузов. Приборостроение. 2016. Т. 59, № 9. С. 767—772.

THE UNCERTAINTY OF MEASURING UNSTEADY SURFACE TEMPERATURE OF MASSIVE BODIES

N. V. Pilipenko

ITMO University, 197101, St. Petersburg, Russia
E-mail: pilipenko38@mail.ru

Methodical uncertainties in measurements of unsteady surface temperature of massive bodies using various contact temperature converters are analyzed. Two approaches to the problem of actual temperature retrieving are considered: 1) based on Laplace transform application, leading to operational method of integration of arising differential equations, and 2) an approach using difference-differential models of heat transfer in the system of a thermocouple — object of the study that leads to a numerical-analytical calculation method.

Keywords: temperature, heat flux, measuring converter of temperature, indeterminacy of measurement, differential-difference models

Data on author

Nikolay V. Pilipenko — Dr. Sci., Professor; ITMO University, Department of Computer Thermal Physics and Energy-Physical Monitoring; E-mail: pilipenko38@mail.ru

For citation: Pilipenko N. V. The uncertainty of measuring unsteady surface temperature of massive bodies // Izv. vuzov. Priborostroenie. 2016. Vol. 59, N 9. P. 767—772 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2016-59-9-767-772