

УДК 536.629.7

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ
БАТАРЕЙНЫХ ПРИЕМНИКОВ ТЕПЛООВОГО ПОТОКА
В НЕСТАЦИОНАРНОЙ ТЕПЛОМЕТРИИ****И.А. Сиваков**

Приведены результаты эксперимента, показывающие возможность применения батарейного приемника теплового потока (датчик Геращенко) в нестационарной теплотометрии с использованием метода параметрической идентификации модели теплопереноса в датчике.

Ключевые слова: нестационарная теплотометрия, приемники теплового потока, датчик Геращенко, обратная задача теплопроводности, параметрическая идентификация, фильтр Калмана, дифференциально-разностная модель.

Введение

В настоящее время разрабатываются и широко используются для прикладной теплотометрии различного типа приемники тепловых потоков (ППП), которые, как правило, представляют собой автономные, достаточно миниатюрные устройства с одномерным теплопереносом. Во многих практических важных случаях наибольший интерес представляют исследования переходных процессов в изучаемых объектах, когда измерения постоянных или переменных во времени плотностей тепловых потоков выполняются в нестационарных режимах работы ППП. Таким образом, нестационарная теплотометрия является одной из наиболее проблемных задач прикладной теплотометрии при исследовании промышленных объектов и технологических процессов.

В настоящее время при исследовании процессов теплообмена для определения тепловых потоков используются два общих подхода. Первый, традиционный, состоит в расчете по простым, часто алгебраическим формулам, где основные проблемы заключаются в конструировании различных узлов прибора, чтобы эти формулы можно было применить. В основе метода лежит прямая градуировка ППП, в ряде случаев – на специальных стендах, создание которых требует значительных усилий.

Второй подход, интенсивно развивающийся последние 30–40 лет, составляют методы и принципы решения обратных задач теплопроводности (ОЗТ) и различные алгоритмы оптимизации. Данный подход заключается в расчетном определении (восстановлении) плотности входящего в ППП теплового потока по измеряемым температурам в отдельных точках ППП. Такие задачи относятся к нестационарным граничным ОЗТ, а в аспекте измерительной техники – к косвенным методам измерений. Этот подход является прямо противоположным первому: при значительной простоте конструкции приходится обрабатывать большие объемы данных по специальным алгоритмам. С помощью решения ОЗТ можно определять температуры, которые по каким-либо причинам нельзя непосредственно измерить, глубину заделки термомпар, начальное распределение температур и многое другое. В математической физике такие задачи называются некорректно поставленными и могут иметь неустойчивое решение, очень чувствительное к погрешностям измерения температур. Существуют различные методы решения обратных задач. Выбор наиболее универсального, помехозащищенного и вычислительно эффективного метода для определенного класса задач является достаточно сложной проблемой.

В работах Д.Ф. Симбирского, А.В. Олейника, Н.В. Пилипенко, Дж. Бека и др. предложено использовать рекуррентные (последовательные) методы параметрической идентификации, в частности, базирующиеся на модифицированном алгоритме цифрового фильтра Калмана (ФК). Изначально разработанные для использования в измерительных системах реального времени, данные методы доказали свою эффективность при решении ряда граничных задач для различных типов ППП [1–4]. Для решения таких задач удобно использовать метод параметрической идентификации дифференциально-разностной модели (ДРМ) теплопереноса в исследуемом объекте с использованием рекуррентного цифрового ФК по искомым параметрам [3, 4]. Оценка возможностей такого подхода показала [3–6], что его применение позволяет получить приемлемые для практики результаты.

Исторически наибольшее распространение и популярность на территории Российской Федерации и СНГ получили малогабаритные градиентные батарейные ППП, разработанные в начале 1970-х г.г. под руководством О.А. Геращенко и в дальнейшем развиваемые его последователями. Данный вид датчиков серийно выпускается на многих предприятиях и находит широкое применение в прикладной стационарной теплотометрии. Тепломеры Геращенко обладают рядом положительных особенностей, однако, в силу своей тепловой инерционности они ограничены в части измерения быстро меняющихся или постоянных тепловых потоков, но в динамических условиях (при ограничениях на время единичного измерения).

В настоящей работе предлагается метод восстановления нестационарного теплового потока, на основе параметрической идентификации модели теплопереноса в батарейном ПТП и результаты его экспериментального исследования. Кратко остановимся на способе получения оптимальных оценок теплового потока.

Параметрическая идентификация процесса теплопереноса

Как известно, динамика тепловых процессов в общем случае описывается одним или несколькими параболическими уравнениями в частных производных с соответствующими граничными условиями и представляется в виде температурного поля в некоторой многосвязной области. Так как температурное поле обычно кусочно-непрерывно (имеет конечное число разрывов), то в каждый момент времени с некоторой погрешностью δ оно может быть описано температурами счетного числа точек $n = n(\delta)$, зависящего от δ (при $\delta \rightarrow 0, n \rightarrow \infty$) [3]. В этом и заключается смысл дифференциально-разностной аппроксимации.

Для получения оптимальных оценок теплового потока вначале рассматривается прямая задача теплопроводности, метод решения которой основан на использовании ДРМ, которые представляют собой системы обыкновенных дифференциальных уравнений первого порядка относительно вектора температурного состояния $\mathbf{T}(\tau) = [t_i(\tau)]_{i=1}^n$, где $t_i(\tau)$ – температуры элементарных участков (блоков размером Δ), отнесенные к их центрам (для граничных блоков – к их торцевым поверхностям). ДРМ позволяет учесть практически все особенности тепловых схем для ПТП различных видов и в общем случае имеет вид [1, 2, 5, 6]

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

где F – $(n \times n)$ -матрица обратных связей; G – $(n \times 2)$ -матрица управления. Вектор управления $\mathbf{U}(\tau)$, в частности, для условий 2-го рода на торцах ПТП, имеет вид $\mathbf{U}(\tau) = [q_1(\tau) \quad q_2(\tau)]^T$.

Тепловая схема, подробный вывод и топология ДРМ батарейного ПТП, а также структура матриц управления и обратных связей приведены в работе [7].

В ПТП подлежат измерению либо температуры в отдельных точках, либо их разности, либо средние температуры, что отражено в $(m \times n)$ -матрице измерений H универсальной модели измерений

$$\mathbf{Y}_k = H\mathbf{T}_k + \boldsymbol{\varepsilon}_k,$$

где \mathbf{Y}_k – $(m \times 1)$ -вектор измерений; $\boldsymbol{\varepsilon}_k$ – $(m \times 1)$ -вектор случайных погрешностей.

В дальнейшем решается ОЗТ. При этом принимается допущение о том, что известен характер изменения $q(\tau)$, который позволяет с требуемой точностью выполнить кусочно-линейную аппроксимацию на всем интервале его изменения $\overline{0, \tau_N}$. Искомый тепловой поток задается в виде [3, 5]:

$$q(\tau) = \sum_{j=1}^r q_j \varphi_j(\tau),$$

где $\varphi_j(\tau)$ – система базисных функций времени, а q_j – априори неизвестные коэффициенты, которые объединяются в $(r \times 1)$ -вектор искомых параметров

$$\mathbf{Q} = [q_1 \quad q_2 \quad \dots \quad q_r]^T.$$

В качестве базисной функции используются В-сплайны 1-го порядка. При этом интервал $\overline{0, \tau_N}$ разбивается на одинаковые участки сплайн-аппроксимации Δ_z ($z = 1, 2, 3, \dots, r-1$); каждый из них включает l моментов времени измерений \mathbf{Y}_k , т.е. имеет протяженность $\Delta_z = l \cdot \Delta\tau$. Тогда на каждом участке аппроксимация $q(\tau)$ имеет вид $q_z = q_{a,z} \cdot Sp_z^{(1)} + q_{b,z} \cdot Sp_{z+1}^{(1)}$, где $q_{a,z}$ и $q_{b,z}$ – значения q на левой и правой границах участка соответственно; $Sp_z^{(1)}$ и $Sp_{z+1}^{(1)}$ ($z = 1, 2, 3, \dots, r-1$) – В-сплайны.

Величины $q_{a,z}$ и $q_{b,z}$ на каждом z -ом участке объединяются в (2×1) -вектор искомых параметров $\mathbf{Q}_z = [q_{az} \quad q_{bz}]^T$. Благодаря сквозной аппроксимации В-сплайнами на всем интервале измерения $\overline{0, \tau_N}$ на границах выполняются равенства $q_{a,z+1} = q_{b,z}$; $q_{a,z+2} = q_{b,z+1}$; ... По мере поступления измерений \mathbf{Y}_k вычисления перемещаются от участка $z = 1$ к участку $z = 2$ и т. д., тем самым последовательно восстанавливается весь набор искомых значений теплового потока q_1, q_2, \dots, q_r .

Такую аппроксимацию $q(\tau)$ называют параметризацией ОЗТ. Тогда задача восстановления $q(\tau)$ сводится к параметрической идентификации ДРМ теплопереноса в ПТП – последовательному получению оптимальных оценок $\hat{Q}_{z,l}$ вектора искомых параметров Q_z на каждом участке Δ_z путем минимизации по Q_z квадратичной функции невязки

$$\Phi(Q_z) = \sum_{k=1}^l (Y_k - \hat{Y}_k(Q_z))^T \cdot R^{-1} \cdot (Y_k - \hat{Y}_k(Q_z)),$$

где $\hat{Y}_k(Q_z)$ – аналог вектора измерений Y_k , рассчитываемый по ДРМ теплопереноса в ПТП для различных значений искомых параметров Q_z , который будем называть модельным вектором измерений; R – ковариационная $(m \times m)$ -матрица вектора ϵ_k случайных погрешностей в измерениях температур ПТП.

С учетом требований к теплотрическим измерительным системам реального времени при выборе алгоритма минимизации функции невязки $\Phi(Q_z)$ предпочтение отдано рекуррентным алгоритмам, в частности, алгоритмам цифрового ФК [3, 4]. Они отличаются высокой вычислительной эффективностью и изначально предназначены для работы в измерительно-вычислительных системах реального времени. Для получения оптимальных оценок Q_{k+1} вектора Q в $(k+1)$ -й момент времени ФК по искомым параметрам имеет вид [2, 4–6]

$$Q_{k+1} = \hat{Q}_k + K_{k+1}[Y_{k+1} - \hat{Y}_{k+1}(\hat{Q}_k)],$$

$$K_{k+1} = P_k H_k^T (H_k P_k H_k^T + R)^{-1},$$

$$P_{k+1} = P_k - K_{k+1} H_k P_k,$$

где P_k, P_{k+1} – ковариационные матрицы ошибок оценок параметров для моментов времени $\tau_k = k \cdot \Delta\tau$ и $\tau_{k+1} = (k+1)\Delta\tau$; H_k – матрица коэффициентов чувствительности измеряемой температуры ПТП к изменению искомых параметров в момент времени τ_{k+1} ; K_k – весовая матрица.

В качестве иллюстрации возможностей предлагаемого метода на рис. 1 представлены результаты имитационного моделирования восстановления теплового потока для батарейного ПТП при различных внешних воздействиях (различных законах изменения теплового потока). Параметры датчика приведены в таблице.

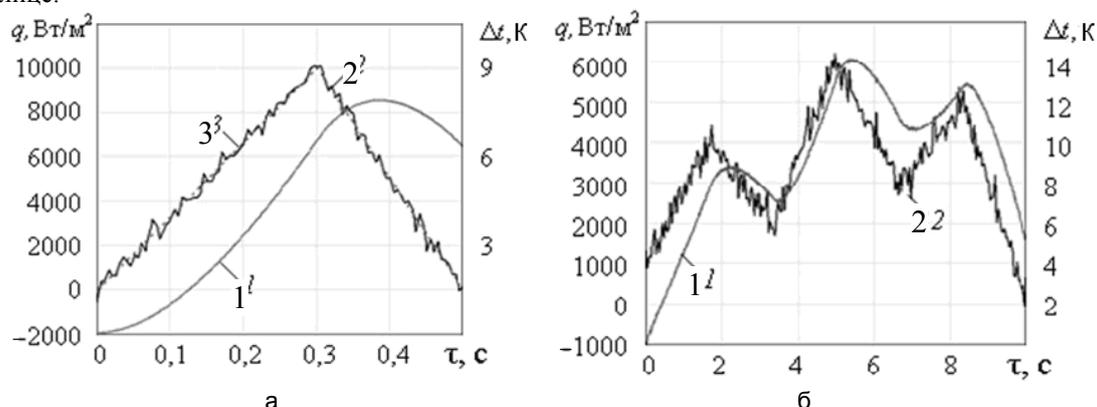


Рис. 1. Результаты имитационного моделирования восстановления теплового потока для батарейного ПТП при различных законах изменения теплового потока: импульсное воздействие (а); периодический закон (б). Обозначения: 1 – измеренная разность температуры; 2 – восстановленный тепловой поток; 3 – истинный тепловой поток

Толщина $\delta \cdot 10^3, \text{ м}$	Теплопроводность $\lambda, \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$	Температуропроводность $a \cdot 10^6, \text{ м}^2/\text{с}$
$\delta_1 = 0,1$	$\lambda_1 = 0,2$	$a_1 = 0,11$
$\delta_2 = 1,3$	$\lambda_2 = 0,7$	$a_2 = 0,22$
$\delta_3 = 0,1$	$\lambda_3 = 0,2$	$a_3 = 0,11$

Таблица. Основные характеристики батарейного ПТП

Как показывают результаты имитационного моделирования, предложенный метод восстановления теплового потока путем параметрической идентификации позволяет с высокой точностью восстанавливать нестационарный тепловой поток с использованием батарейных ПТП.

Экспериментальная проверка

Для дальнейшей проверки возможности применения батарейных ПТП в нестационарной теплотметрии проведена серия экспериментов на установке для задания нестационарного теплового потока и определения динамических характеристик ПТП.

В качестве источника теплового потока используется галогенная лампа типа КГЛ-100-12V с оптической системой в виде эллиптического отражателя. Использование эллиптического отражателя позволяет собрать во втором его фокусе значительно большую часть излучаемой лампой мощности по сравнению с линзовыми конденсорами. Между оптической системой и испытуемым датчиком располагается диск модулятора, который служит для задания нестационарных тепловых потоков различной частоты. Сигнал ПТП регистрируется с помощью компьютерного цифрового осциллографа фирмы Velleman типа PCS500.

Величина теплового потока, излучаемого лампой, определена экспериментально и составляет $q_0 = 6 \cdot 10^4 \text{ Вт/м}^2$. Так как форма модуляции близка к синусоидальной, можно считать, что при включенном модуляторе действующий тепловой поток определяется соотношением $q(\tau) = 0,5q_0(1 + \sin \omega\tau)$, где q_0 – среднее значение теплового потока; ω – частота изменения потока; τ – время.

Используемый в опыте датчик, имеющий постоянную времени порядка 5 с, подвергался воздействию модулированного лучистого потока при различных частотах модуляции. Между экспериментами делалась пауза, достаточная для остывания датчика и конструктивных элементов установки. Полученные экспериментальные результаты сохранялись на компьютере, после чего производилась их обработка в программном комплексе «Heat Flow», разработанном на кафедре компьютерной теплофизики и энергофизического мониторинга СПб НИУ ИТМО. Обработка осуществлялась в два этапа:

- фильтрация и сглаживание зашумленного входного сигнала;
- восстановление плотности теплового потока по результатам термометрии.

Современное вычислительное оборудование позволяет проводить обе эти операции в реальном времени. На рис. 2 приведены результаты эксперимента по восстановлению плотности теплового потока, изменяющегося с частотой 2 Гц. Границы применимости предложенного метода для данного датчика (постоянная времени 5 с) – нестационарные тепловые потоки с частотой до 2–2,5 Гц.

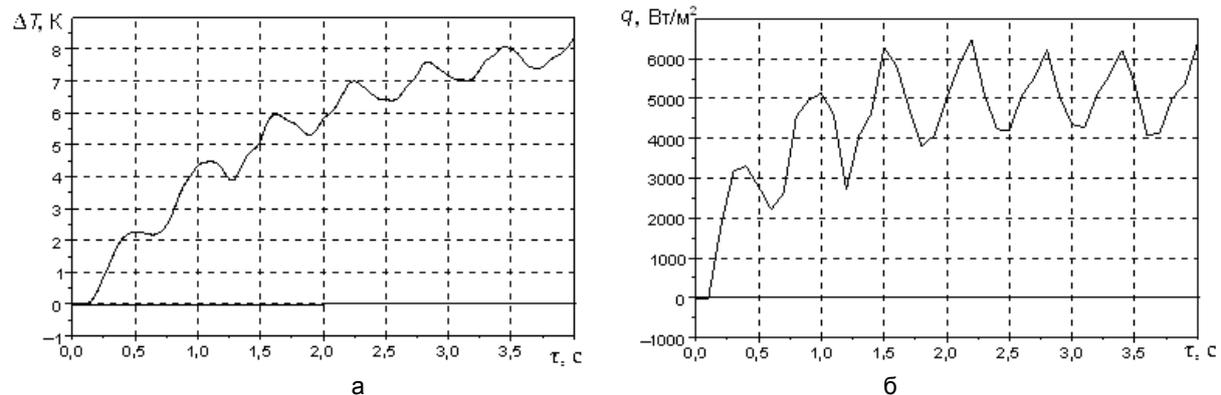


Рис. 2. Результат восстановления плотности теплового потока методом параметрической идентификации по результатам экспериментальной термометрии (после предварительной фильтрации) с использованием батарейного ПТП при воздействии нестационарного теплового потока с частотой 2 Гц:

измеренный перепад температур по толщине датчика (а); восстановленный тепловой поток (б)

Заключение

Представлен и обоснован метод решения граничной обратной задачи теплопроводности – восстановления плотности теплового потока по изменению перепада температур по толщине батарейного ПТП. Для решения задачи использован метод параметрической идентификации дифференциально-разностной модели теплопереноса в ПТП.

В качестве иллюстрации возможностей предложенного метода приведены результаты имитационного моделирования по восстановлению плотности теплового потока при различных видах воздействия с использованием модели батарейного ПТП.

Проведены экспериментальные исследования батарейного датчика, которые показали возможность его использования для целей нестационарной теплотметрии и позволили установить границы применимости предложенного метода. Для исследованного батарейного датчика с постоянной времени 5 с максимальная частота изменения плотности теплового потока составляет 2–2,5 Гц. При увеличении частоты изменения плотности теплового потока компенсировать высокую инерционность рассматриваемого датчика расчетными методами не представляется возможным.

Полученные результаты показывают, что использование метода параметрической идентификации при восстановлении плотности теплового потока позволяет существенно расширить возможности некоторых видов датчиков, в том числе дает возможность использования стационарных датчиков для целей нестационарной теплометрии.

Литература

1. Пилипенко Н.В. Методы параметрической идентификации в нестационарной теплометрии. Ч. 1 // Изв. вузов. Приборостроение. – 2003. – Т. 46. – № 8. – С. 50–54.
2. Пилипенко Н.В. Методы параметрической идентификации в нестационарной теплометрии. Ч. 2 // Изв. вузов. Приборостроение. – 2003. – Т. 46. – № 10. – С. 67–71.
3. Пилипенко Н.В. Нестационарная теплометрия на основе параметрической идентификации дифференциально-разностных моделей теплопереноса в одномерных приемниках: Автореф. дис. ... докт. техн. наук. – СПб, 2008. – 35 с.
4. Кириллов К.В., Пилипенко Н.В. Алгоритмы программ для решения прямых и обратных задач теплопроводности при использовании дифференциально-разностных моделей // Научно-технический вестник СПб ГУИТМО. – 2010. – № 5 (69). – С. 106–110.
5. Пилипенко Н.В., Сиваков И.А. Метод определения нестационарного теплового потока и теплопроводности путем параметрической идентификации // Измерительная техника. – 2011. – № 3. – С. 48–51.
6. Pilipenko N.V., Sivakov I.A. A method of determining nonstationary heat flux and heat conduction using parametric identification // Measurement Techniques. – 2011. – V. 54. – № 3. – P. 318–323.
7. Пилипенко Н.В., Лазуренко Н.В., Лебедев П.В. Параметрическая идентификация нестационарных тепловых потоков с помощью тепломера типа «вспомогательная стенка» // Изв. вузов. Приборостроение. – 2005. – Т. 48. – № 9. – С. 47–51.

Сиваков Иван Анатольевич

– Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, аспирант, i.a.sivakov@gmail.com