

---

---

# ТЕПЛОВЫЕ РЕЖИМЫ ПРИБОРОВ И СИСТЕМ

---

---

УДК 536.629.7

Н. В. ПИЛИПЕНКО, Г. В. ПОЛЬЩИКОВ, И. А. СИВАКОВ

## УСТАНОВКА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СЕНСОРОВ ТЕПЛООВОГО ПОТОКА

Представлена конструкция стенда для задания нестационарного теплового потока и измерения динамических характеристик датчиков. Приведены результаты эксперимента, показывающие возможность применения батарейного приемника теплового потока (датчика Геращенко) в нестационарной теплотометрии.

*Ключевые слова:* нестационарная теплотометрия, датчик Геращенко, обратная задача теплопроводности, параметрическая идентификация.

Решение задач прикладной теплотометрии для таких отраслей науки и техники, как теплоэнергетика, металлургия, авиа-, судо- и ракетостроение, мощное приборостроение и пр., определяет дальнейший потенциал их развития. В некоторых практически важных случаях интерес представляет исследование переходных процессов в изучаемых объектах, когда измерения постоянных или переменных во времени плотностей тепловых потоков выполняются в нестационарном режиме работы приемников теплового потока (ППП).

Один из интенсивно развивающихся в последние 30—40 лет подходов к этой проблеме — использование методов решения обратных задач теплопроводности (ОЗТ) и различных алгоритмов оптимизации. Особенности данного подхода являются расчетное определение (восстановление) теплового потока по измеряемым температурам в отдельных точках ППП и возможность определения температур, которые по каким-либо причинам нельзя непосредственно измерить, уточнение глубин заделки термопар, начальных распределений температур и др.

Существуют различные методы решения обратных задач. Выбор наиболее универсального, помехозащищенного и вычислительно эффективного метода решения для определенного класса задач является достаточно сложной проблемой.

В работах Д. Ф. Симбирского, А. В. Олейника, Н. В. Пилипенко, Дж. Бека и других авторов предложено использовать рекуррентные (последовательные) методы параметрической идентификации, базирующиеся, в частности, на модифицированном алгоритме цифрового фильтра Калмана. Изначально разработанные для использования в измерительных системах реального времени, данные методы доказали свою эффективность при решении ряда граничных задач для различных типов ППП [1, 2]. Оценка возможностей подхода на основе решения обратных задач теплопроводности показала [3—5], что его применение позволяет получить приемлемые для практики результаты.

В настоящей статье рассматривается метод восстановления нестационарного теплового потока на основе параметрической идентификации модели теплопереноса в ППП, представлена конструкция разработанной установки для задания нестационарных тепловых потоков и определения динамических характеристик ППП, а также приведены результаты эксперимента по восстановлению плотности теплового потока с использованием тепломера Геращенко.

Рассмотрим кратко способ получения оптимальных оценок теплового потока  $q(\tau)$ . 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. Процесс теплопереноса в ПТП может быть описан с использованием дифференциально-разностной модели (ДРМ), которая в общем случае имеет следующий вид [1, 2]:

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

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, определяется как  $\mathbf{U}(\tau) = [q_1(\tau) \quad q_2(\tau)]^T$ .

Тепловая схема, подробный вывод и топология ДРМ батарейного ПТП, а также структура матриц управления и обратных связей приведены в работе [6].

В приемниках теплового потока измерению подлежат либо температуры в отдельных точках, либо их разности, либо среднеобъемные температуры, что отражено в  $m \times n$ -матрице измерений  $D$  универсальной модели измерений:

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

где  $\mathbf{Y}_k$  —  $m \times 1$ -вектор измерений в  $k$ -й момент времени,  $\boldsymbol{\varepsilon}_k$  —  $m \times 1$ -вектор случайных погрешностей измерений температур.

Искомый тепловой поток задается уравнением [4]

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

где  $\varphi_j(\tau)$  — система базисных функций времени;  $q_j$  — априори неизвестные коэффициенты, которые объединяются в  $r \times 1$ -вектор искомых параметров  $\mathbf{Q}_z = [q_1 \quad q_2 \quad \dots \quad q_r]^T$ .

В качестве базисной функции используются В-сплайны 1-го порядка.

Такую аппроксимацию  $q(\tau)$  называют параметризацией ОЗТ. Тогда задача восстановления  $q(\tau)$  сводится к последовательному получению оптимальных оценок  $\hat{\mathbf{Q}}_{z,l}$  вектора искомых параметров  $\mathbf{Q}_z$  путем минимизации по  $\mathbf{Q}_z$  квадратичной функции невязки:

$$\Phi(\mathbf{Q}_z) = \sum_{k=1}^l (\mathbf{Y}_k - \hat{\mathbf{Y}}_k(\mathbf{Q}_z))^T R^{-1} (\mathbf{Y}_k - \hat{\mathbf{Y}}_k(\mathbf{Q}_z)),$$

где  $\hat{\mathbf{Y}}_k(\mathbf{Q}_z)$  — модельный вектор измерений, являющийся аналогом вектора  $\mathbf{Y}_k$  и рассчитываемый по ДРМ теплопереноса в ПТП для различных значений вектора  $\mathbf{Q}_z$ ;  $R$  — ковариационная  $m \times m$ -матрица вектора  $\boldsymbol{\varepsilon}_k$  случайных погрешностей.

Для получения оптимальных оценок  $\mathbf{Q}_{k+1}$  вектора искомых параметров  $\mathbf{Q}_z$  в  $(k+1)$ -й момент времени используется рекуррентный алгоритм фильтра Калмана по искомым параметрам [3—5]:

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

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

где  $P_k, P_{k+1}$  — ковариационные матрицы погрешностей оценок параметров для моментов времени  $\tau_k = k\Delta\tau$  и  $\tau_{k+1} = (k+1)\Delta\tau$ ;  $H_k$  — матрица коэффициентов чувствительности изме-

ряемой температуры ПТП к изменению искомым параметров в момент времени  $\tau_{k+1}$ ;  $K_k$  — весовая матрица.

Теоретическая возможность использования высокоинерционных датчиков при исследовании быстропротекающих процессов показана в работе [6], однако полученные в ней результаты требуют экспериментальной проверки.

В качестве объекта исследования был выбран батарейный ПТП (тепломер Геращенко) как наиболее распространенный и обладающий рядом положительных характеристик. Для оценки возможности применения батарейных ПТП в нестационарной теплотрии была создана установка для задания нестационарного потока, структурная схема которой приведена на рис. 1.

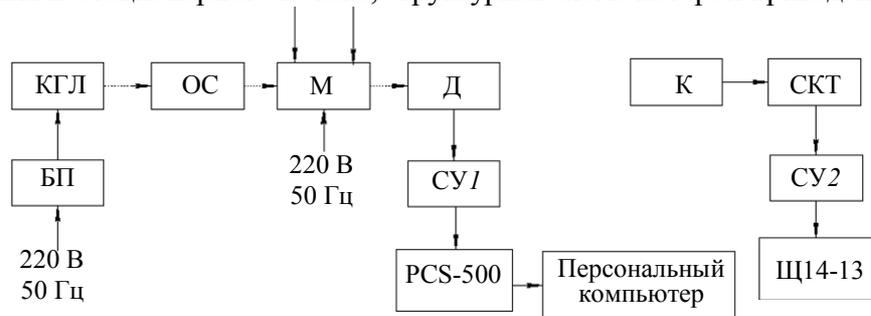


Рис. 1

В качестве излучателя использовалась галогенная лампа типа КГЛ-100-12V с оптической системой (ОС) в виде эллиптического отражателя. Использование такого отражателя позволяет сфокусировать на объекте значительно большую часть излучаемой лампой мощности по сравнению с линзовыми конденсорами. Питание лампы осуществлялось через трансформаторный блок (БП). Между оптической системой и исследуемым датчиком (Д) располагался модулятор (М), используемый при проведении испытаний с модулированным потоком излучения. Согласующий усилитель (СУ1) обеспечивает работу датчика, сигнал которого регистрируется компьютерным цифровым осциллографом типа PCS500 фирмы “Velleman” (Бельгия).

Так как спектр излучения лампы находится в широком спектральном диапазоне (от ультрафиолетового до дальнего инфракрасного), а пучок излучения, формируемый эллиптическим отражателем, имеет сложную пространственную структуру, то измерить тепловой поток лампы в плоскости исследуемого датчика стандартными средствами не представляется возможным. Поэтому был разработан и изготовлен калориметр (К) с квазиобъемным поглотителем и апертурной зеркальной диафрагмой. Конструктивная схема калориметра приведена на рис. 2.

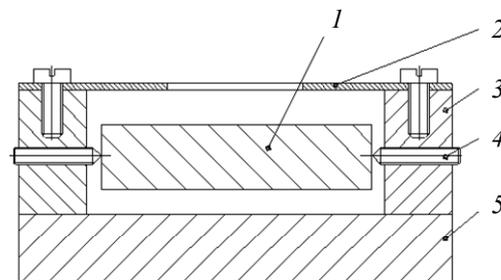


Рис. 2

Измерительное ядро 1 калориметра, представляющее собой алюминиевую пластинку, на одну сторону которой нанесено поглощающее покрытие (остальные грани ядра свободны), закреплено с помощью двух кернов 4 с большим тепловым сопротивлением относительно боковых стоек 3, жестко установленных на основании 5. Коэффициент отражения внутренних поверхностей всех деталей составляет не менее 0,95. Зеркальная диафрагма 2 формирует входной зрачок калориметра  $10 \times 10 \text{ мм}^2$ . Для уменьшения тепловых потерь за счет конвективных потоков расстояние между конструктивными элементами не превышает 2—3 мм.

Для обеспечения эффективного поглощения излучения во всем спектральном диапазоне использовалось комбинированное поглощающее покрытие. Первоначально наносилось глубокое аноксовое покрытие, а затем наносился лак Паркинсона с медленной сушкой в малом свободном объеме. Эффективность такого покрытия характеризуется коэффициентом поглощения 0,98—0,99.

Система контроля температуры (СКТ) — см. рис. 1 — содержит медьконстантановые термопары. Согласующий усилитель (СУ2) позволяет использовать для регистрации сигнала термопар любой вольтметр постоянного тока; в данном случае выбран вольтметр Ц14-13.

Галогенная лампа, эллиптический отражатель и модулятор потока излучения конструктивно объединены в блок излучателя, общий вид которого показан на рис. 3. Основанием блока служит алюминиевая плита 1, обеспечивающая жесткость всей конструкции. На оси 3 расположен двухлопастной диск модулятора 2, который приводится во вращение синхронным двигателем типа Г32. На оси двигателя установлен шкив, обеспечивающий различные скорости вращения диска модулятора. Частота модуляции (от 0,1 до 10 Гц) зависит от количества оборотов двигателя, количества лопастей модулятора и диаметра шкива двигателя.

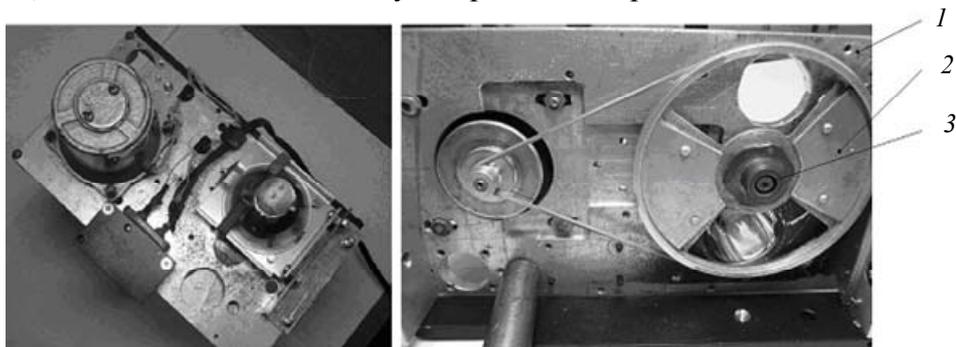


Рис. 3

При разработке электрической схемы установки учитывалось влияние помех, шумов и температурного дрейфа всех ее элементов. При этом в первом каскаде использовались операционный усилитель с автоматической балансировкой начального смещения и малым уровнем шума, система гальванической развязки для снижения уровня помех, а также дополнительный каскад усиления.

После сборки и юстировки установки с помощью калориметра определялась плотность теплового потока, выполнялась стабилизация галогенной лампы в течение длительного времени, после чего проводилась 20-секундная экспозиция входного окна калориметра и записывалась динамика изменения температуры ядра. На основе полученных данных установлено, что плотность теплового потока, генерируемого галогенной лампой, составляет порядка  $q_0 = 6 \cdot 10^4$  Вт/м<sup>2</sup>.

Так как форма модуляции близка к синусоидальному виду, можно считать, что при включенном модуляторе действующий тепловой поток определяется соотношением  $q(\tau) = 0,5q_0(1 + \sin \omega\tau)$ , где  $\omega$  — частота вращения диска модулятора.

В ходе испытаний плоскость установки приемника теплового потока совмещалась с плоскостью, в которой находилась диафрагма калориметра, проводилась юстировка ПТП относительно светового пятна излучателя и определялась постоянная времени датчика — в рассматриваемом случае равная примерно 5 с. В ходе эксперимента фиксировалось изменение перегрева ( $\Delta T$ ) по толщине батарейного ПТП во времени. Затем датчик подвергался воздействию модулированного лучистого потока того же источника при различных частотах модуляции. Между экспериментами выдерживалась пауза, достаточная для остывания датчика и конструктивных элементов установки.

Полученные экспериментальные результаты сохранялись в компьютере, после чего производилась их обработка с помощью программного комплекса “Heat Flow”, разработанного на кафедре компьютерной теплофизики и энергофизического мониторинга Санкт-Петербургского национального исследовательского университета информационных технологий, механики и оптики. На рис. 4, а, б соответственно в виде графиков зависимостей  $\Delta T(\tau)$  и  $q(\tau)$  приведены результаты эксперимента по восстановлению плотности теплового потока,

изменяющегося с частотой 2 Гц, с использованием батарейного приемника теплового потока с постоянной времени порядка 5 с.

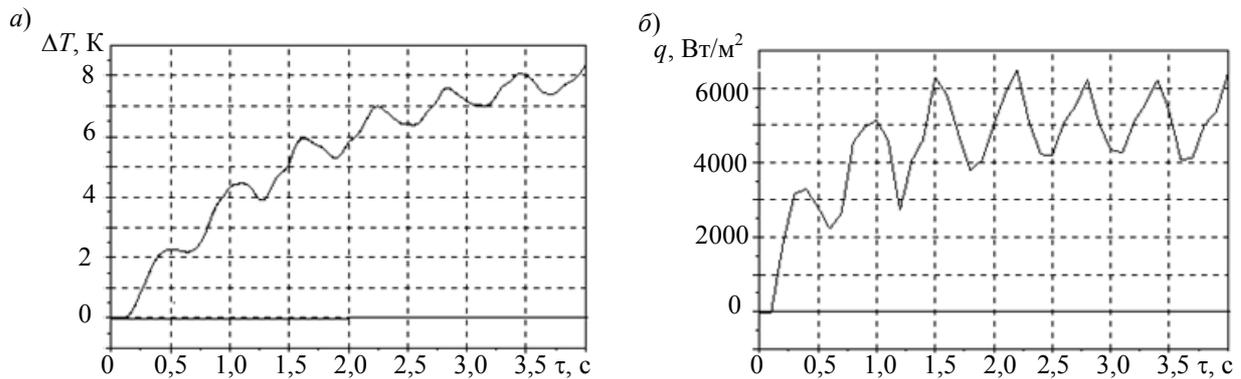


Рис. 4

Проведенные экспериментальные исследования батарейного датчика показали возможность его использования в нестационарной теплотрии. Согласно полученным результатам предложенный метод параметрической идентификации при восстановлении плотности теплового потока позволяет существенно расширить возможности некоторых видов датчиков.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пилипенко Н. В. Методы параметрической идентификации в нестационарной теплотрии. Часть 1 // Изв. вузов. Приборостроение. 2003. Т. 46, № 8. С. 50—54.
2. Пилипенко Н. В. Методы параметрической идентификации в нестационарной теплотрии. Часть 2 // Там же. 2003. Т. 46, № 10. С. 67—71.
3. Кириллов К. В., Пилипенко Н. В. Алгоритмы программ для решения прямых и обратных задач теплопроводности при использовании дифференциально-разностных моделей // Науч.-техн. вестн. СПбГУ ИТМО. 2010. № 5. С. 106—110.
4. Пилипенко Н. В., Сиваков И. А. Метод определения нестационарного теплового потока и теплопроводности путем параметрической идентификации // Измерительная техника. 2011. № 3. С. 48—51.
5. Pilipenko N. V., Sivakov I. A. A method of determining nonstationary heat flux and heat conduction using parametric identification // Measurement Techniques. 2011. Vol. 54, N 3. P. 318—323.
6. 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.

## Сведения об авторах

**Николай Васильевич Пилипенко**

— д-р техн. наук, профессор; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра компьютерной теплофизики и энергофизического мониторинга; E-mail: Pilipenko38@mail.ru

**Георгий Владимирович Польщиков**

— канд. техн. наук, доцент; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра компьютерной теплофизики и энергофизического мониторинга; E-mail: polschikov@list.ru

**Иван Анатольевич Сиваков**

— аспирант; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра компьютерной теплофизики и энергофизического мониторинга; E-mail: I.A.Sivakov@gmail.com; SivakovIA@mail.ru

Рекомендована кафедрой  
компьютерной теплофизики  
и энергофизического мониторинга

Поступила в редакцию  
04.05.12 г.