

## Анализ погрешностей измерения тепловых потоков при испытаниях конструкций, нагреваемых излучением

© В.А. Товстоног, Т.В. Боровкова, В.Н. Елисеев

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

*Рассмотрены бесконтактные и контактные способы измерения тепловых потоков. Выполнен их сравнительный анализ и отмечены преимущества контактных способов, основанных на решении обратных задач теплопроводности. Показано, что корректность результатов теплофизического эксперимента во многом зависит от точности определения теплового потока. Достоинством методов, основанных на решении обратных задач теплопроводности, является возможность создания малогабаритных датчиков, конструктивно оформленных как элементы исследуемой системы. Это позволяет контролировать локальные значения теплового потока непосредственно в условиях натурального нагрева, причем на практике в некоторых случаях достаточно измерить изменение температуры датчика в одной его точке. Приведены результаты исследования погрешности измерения температуры чувствительного элемента датчика, предназначенного для определения теплового потока при интенсивном радиационном воздействии на нагреваемый объект.*

**Ключевые слова:** радиационный нагрев, калориметрические датчики, погрешности, термонара, обратные задачи теплопроводности.

Плотность теплового потока — важнейший параметр, определяющий тепловое состояние объекта испытаний (ОИ), а корректность результатов экспериментов во многом зависит от точности его определения. Характерной особенностью высокотемпературных теплофизических исследований является интенсивное прохождение процессов, сопутствующих нагреву, в нестационарном и быстропротекающем режиме, поэтому нахождение теплового потока непосредственно в процессе испытаний не всегда возможно. Чаще всего плотность теплового потока на различных режимах работы нагревательных устройств определяют посредством независимых измерений с использованием датчиков (калориметров) теплового потока.

Поскольку измеренный поток излучения (поток к калориметру) содержит частичное отражение падающего излучения и собственное излучение чувствительного (калориметрического, тепловоспринимающего) элемента, то для него справедливо соотношение

$$q_w = A_w q_{wr0} - \varepsilon_w \sigma_B T_w^4,$$

где  $A_w$ ,  $\varepsilon_w$  — поглощательная и излучательная способности калориметрического элемента;  $q_{wr0}$  — плотность потока падающего излу-

чения;  $\sigma_B$  — постоянная Больцмана;  $T_w$  — температура поверхности. Если измерения проводят в условиях, когда температура поверхности калориметрического элемента невысока, то излучением с поверхности можно пренебречь, т. е.  $q_w = A_w q_{wr0}$ .

Известно [1], что поглощательная способность сильно зависит от материала, обработки поверхности, температуры и спектральных свойств поверхности тепловоспринимающего элемента, а также спектрального состава падающего излучения. Поэтому для улучшения метрологических характеристик датчиков потока излучения на поверхность наносят покрытие, обладающее необходимыми характеристиками: высокой стабильностью и спектральной неизбирательностью поглощательной способности. Практика показывает, что наиболее приемлемыми для тепловоспринимающих элементов датчиков потока являются покрытия, полученные черным хромированием или нанесением хромоникелевой шпинели [2, 3]. В некоторых случаях (датчики однократного использования, невысокие требования к точности) возможно использование покрытия, полученного осаждением образующейся при горении органических веществ сажи.

Методы измерения тепловых потоков можно разделить на прямые, когда регистрируемый сигнал связан с тепловым потоком пропорциональной зависимостью, и косвенные, когда регистрируемые величины связаны с тепловым потоком функциональными зависимостями (в общем случае дифференциальными операторами) и его определение сводится к обращению операторов, т. е. относится к области решения граничных обратных задач теплопроводности (ОЗТ).

В теплофизических исследованиях широкое распространение находят методы, основанные на решениях ОЗТ [4–6]. Эти методы применяют при исследованиях процессов сопряженного теплообмена, теплообмена излучением, процессов термического разрушения теплозащитных материалов при высокоинтенсивном нагреве и др. Важное достоинство методов ОЗТ — возможность создания на их основе малогабаритных датчиков, конструктивно оформленных как элементы исследуемой системы, что позволяет контролировать локальные значения теплового потока непосредственно в условиях натурального нагрева.

Определение теплового потока посредством решения ОЗТ сводится к измерению величин, являющихся следствием по отношению к вызвавшей их причине, т. е. тепловому воздействию, и обращению оператора, связывающего причину со следствием. Обычно в качестве исходных данных используют зависимости локальных температур в калориметрическом элементе от времени. Особенность ОЗТ — сильное влияние ошибок измерений (исходных данных) на результаты определения теплового воздействия (теплового потока), в чем проявляется некорректность этих задач. Подробно эти вопросы рассмотрены в работах [4–10].

Учитывая эффективность методов ОЗТ для идентификации тепловых потоков, разработан ряд датчиков, базирующийся на некоторых известных методах решения ОЗТ. Типичная схема и общий вид одного из созданных датчиков приведены на рис. 1.

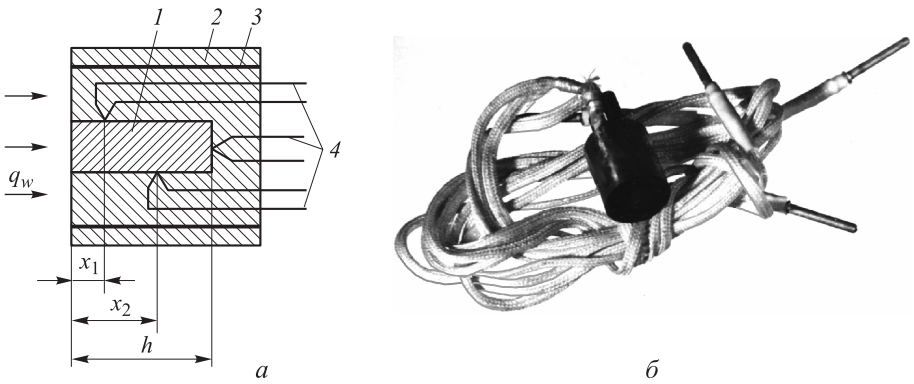


Рис. 1. Схема (а) и общий вид (б) датчика теплового потока, основанного на методе ОЗТ:

1 — калориметрический элемент; 2 — теплоизоляция; 3 — экран; 4 — термопары

Датчик представляет собой чувствительный (калориметрический) элемент из металла, закрепленный в теплоизолирующей втулке. Температура в локальных точках калориметрического элемента измеряется термопарами, число которых и координаты их установки зависят от используемого метода обработки данных по определению плотности потока излучения. Для выравнивания температурного поля по сечению калориметрического элемента служит цилиндрический экран из того же материала, что и калориметрический элемент.

**Метод 1 — идентификация теплового потока по измерениям температуры в одной точке** [11]. Математическая модель в этом случае предполагает одномерный теплоперенос в калориметрическом элементе. Соответствующая краевая задача (начало системы координат совмещено с тыльной теплоизолированной поверхностью калориметрического элемента) имеет вид

$$\begin{aligned} \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} &= \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right); \\ t = 0, T(x, t) &= 0, \quad 0 \leq x \leq h; \\ x = h, q_w(t) &= \Lambda \frac{\partial T}{\partial x}; \\ x = 0, \frac{\partial T}{\partial x} &= 0, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $h$  — толщина калориметрического элемента.

Теплофизические характеристики — функции температуры:

$$c_p = c_0 + c_1 T; \quad \lambda = \lambda_0 + \lambda_1 T.$$

Краевую задачу (1) решаем в виде [11]

$$T(x, t) = a(t) + b(t)x^2, \quad (2)$$

удовлетворяющем краевому условию. Интегрируя уравнение теплопроводности на интервале  $(0, h)$ :

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=h} = q_w(t) = \int_0^h \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} dx,$$

подставляя выражение (2) и учитывая, что при  $x = 0$

$$a(t) = T_0(t); \quad \frac{\partial T}{\partial t} \Big|_{x=0} = a'(t) = T_0'(t),$$

где  $T_0(t)$  — температура на тыльной поверхности калориметрического элемента, получаем

$$q_w = \rho \left[ (c_0 + c_1 T_0) \left( T_0' + \frac{1}{3} h^2 b' \right) h + h^3 b c_1 \left( \frac{1}{3} T_0' + \frac{1}{5} b' h^2 \right) \right]. \quad (3)$$

Подстановка выражения (2) в уравнение теплопроводности при  $x = 0$  и  $x = h$  дает выражения для коэффициентов  $b$  и  $b'$ , входящих в уравнение (3):

$$b = b(t) = \frac{\rho T_0' (c_0 + c_1 T_0)}{2(\lambda_0 + \lambda_1 T_0)};$$

$$b' = b'(t) = \frac{2b(\lambda_0 + \lambda_1 T_0 + 3b\lambda_1 h^2)}{\rho h^2 [c_0 + c_1 (T_0 + b h^2)]} - \frac{T_0'}{h^2}.$$

Таким образом, измерение временной зависимости температуры на тыльной поверхности калориметрического элемента позволяет по формуле (3) определить нестационарный тепловой поток.

**Метод 2 — идентификация теплового потока по измерениям температуры в двух точках.** Если температуру измеряют в двух точках калориметрического элемента (см. рис. 1), то для определения теплового потока можно воспользоваться результатами работы [11]. В этом случае, зная законы изменения избыточной температуры в точках с координатами  $x = x_1$  и  $x = x_2$ , отсчитываемыми от нагреваемой поверхности:  $T(x_1, t) = \varphi_1(t)$  и  $T(x_2, t) = \varphi_2(t)$ , можно определить плотность теплового потока по формуле

$$q_w(t) = \lambda_0 \left\{ \frac{\psi_1(t) - \psi_2(t)}{(1 - \beta)x^2} + \Phi_1(t) + \Phi_2(t) \right\}.$$

Здесь

$$\psi_1(t) = \varphi_1(t) + \frac{\lambda_1}{2\lambda_0} \varphi_1^2(t);$$

$$\psi_2(t) = \varphi_2(t) + \frac{\lambda_1}{2\lambda_0} \varphi_2^2(t);$$

$$\Phi_1(t) = \psi'_1(t) \frac{(2 + 2\beta - \beta^2)x_2}{6a_0e(1-\beta)} \left( \frac{1}{\alpha_1} + \frac{e-1}{\alpha_k} \right);$$

$$\Phi_2(t) = \psi'_2(t) \frac{(1 - 2\beta - 2\beta^2)x_2}{6a_0e(1-\beta)} \left( \frac{1}{\alpha_1} + \frac{e+1}{\alpha_k} \right);$$

$$\beta = 0,5x_1; e = 2,731\dots; a_0 = \frac{\lambda_0}{\rho c_0}; \psi' = \frac{d\psi}{dt};$$

$$\overline{\alpha_k} = \frac{1}{n-1} \sum_{k=2}^n \alpha_k, n \geq 2;$$

$$\alpha_k = \frac{\cos k\pi + \frac{\lambda_1}{2\lambda_0} T_m \left[ \left( 1 - \frac{2}{(k\pi)^2} \right) \cos k\pi + \frac{2}{(k\pi)^2} \right]}{\cos k\pi + \frac{c_1}{2c_0} T_m \left[ \left( 1 - \frac{2}{(k\pi)^2} \right) \cos k\pi + \frac{2}{(k\pi)^2} \right]};$$

$$T_m = -\frac{\lambda_0}{\lambda_1} + \frac{\lambda_0}{\lambda_1} \left[ 1 + 2 \frac{\lambda_0}{\Lambda_1} \Phi_1(0, t_m) \right]^{0,5}$$

( $T_m$  — температура поверхности в конечный момент  $t_m$  времени регистрации). Значение  $\overline{\alpha_k}$  слабо зависит от числа членов ряда, поэтому можно ограничиться  $n = 20$ .

Точность измерения теплового потока при невозмущенных исходных данных в рассмотренных методах оценивали следующим образом. Для заданных геометрических и теплофизических параметров калориметрического элемента и плотности  $q_{w0}$  поглощенного теплового потока численным методом рассчитывали температурное поле в калориметрическом элементе. Полученные таким образом значения температур, соответствующие «прямой» задаче, использовали в качестве исходных данных для определения теплового потока. На рис. 2 приведены зависимости методической погрешности  $\varepsilon_q = (q_w - q_{w0}) / q_{w0}$  для двух методов определения теплового потока плотностью  $0,5\dots 5,0$  МВт/м<sup>2</sup> при двух значениях толщины калориметрического элемента из стали 45.

Видно, что рассмотренные методы в рамках принятых допущений позволяют проводить измерения плотности теплового потока с точностью 2...5 % (нижний предел погрешности).

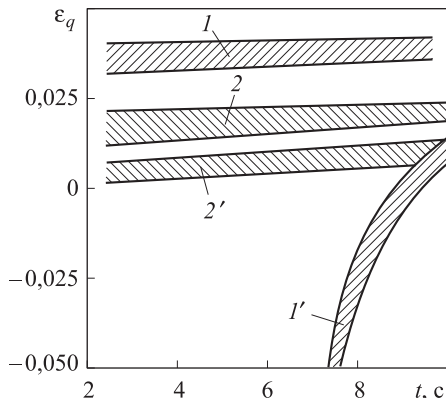
Анализ предложенных методов определения потоков излучения показывает, что в их основе лежит ряд принципиальных допущений. В частности, в методе определения потока по измерениям температуры в одной точке содержатся допущения об одномерности температурного поля в датчике потока и априори считается, что оно может быть описано уравнением (2). На основе этих допущений получено уравнение (3) для идентификации теплового потока. Кроме того, определяемая в эксперименте температура, необходимая для расчета по формуле (3), включает в себя методическую погрешность измерения температуры. Значение этой погрешности зависит от многих факторов и может быть определено только для конкретных условий. Вместе с тем известно, что методы решения ОЗТ чрезвычайно чувствительны к точности задания исходной информации.

В настоящей статье предложена модель расчета методической погрешности определения температуры датчика теплового потока, позволяющая найти ее зависимость от времени нагрева чувствительного элемента. В качестве примера рассмотрен случай определения погрешности при использовании модели датчика с одной термопарой.

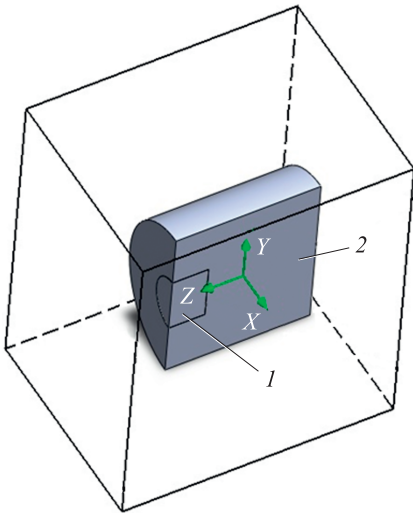
Для случая идентификации теплового потока по измерениям температуры в одной точке построена трехмерная модель в программном комплексе *SolidWorks*. Модель (рис. 3) состоит из чувствительного элемента 1 и охранного элемента 2 из стали 45. Плотность теплового потока принята равной  $0,5 \text{ МВт/м}^2$ , наружная поверхность элемента 2 теплоизолирована, начальная температура тел принята равной  $273 \text{ К}$ , время расчета  $10 \text{ с}$ .

Результаты расчета приведены на рис. 4

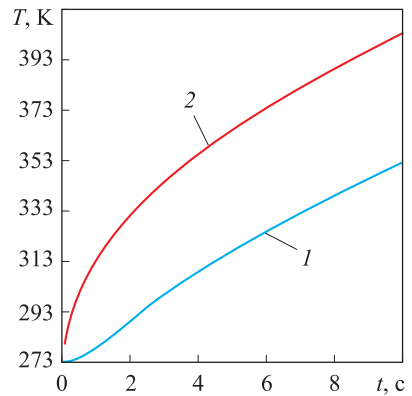
Для оценки погрешности, вносимой установленными термопарами в результаты измерений, построена расчетная модель, включающая спай термопары (хромель-алюмель, диаметр электродов  $0,2 \text{ мм}$ ) и термопарную соломку (наружный диаметр  $2 \text{ мм}$ ) (рис. 5, а). По результатам моделирования построена зависимость температур от времени для центральных точек нагреваемой поверхности и спаев термопары (рис. 5, б).



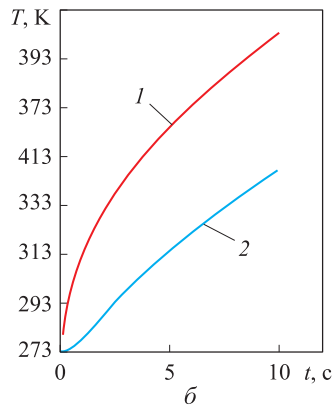
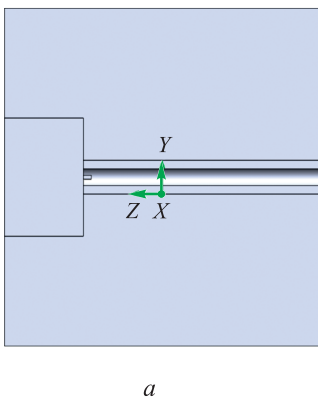
**Рис. 2.** Методические погрешности определения тепловых потоков плотностью  $(0,5...5,0) \text{ МВт/м}^2$  первым (1, 1') и вторым (2, 2') методами при толщине calorиметрического элемента  $h = 5 \text{ мм}$  (1,2) и  $h = 50 \text{ мм}$  (1', 2')



**Рис. 3.** Модель калориметрического датчика:  
1 — калориметрический элемент,  
2 — охранный элемент



**Рис. 4.** Изменение температуры на торце (1) и на поверхности калориметрического элемента (2)



**Рис. 5.** Модель датчика с термопарой, установленной на торце калориметрического элемента (а) и результат расчета температурного поля модели для идентификации теплового потока (б):  
1 — температура нагреваемой поверхности; 2 — температура на торце калориметрического элемента ( $x = 0$ )

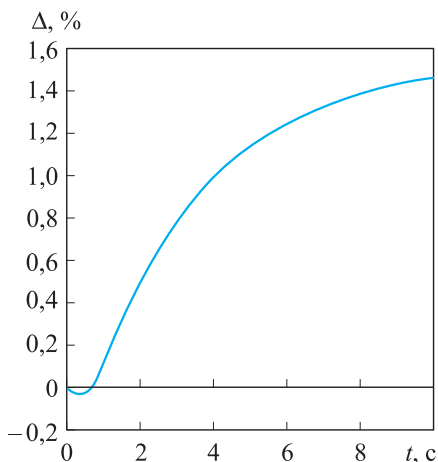
Сопоставление значений температур на торце калориметрического элемента при  $x = 0$  для двух рассмотренных моделей позволяет оценить погрешность, вносимую термопарой (рис. 6). Погрешность определяется по формуле

$$\Delta = \frac{(T_{\text{ид}} - T_{\text{дат}})}{T_{\text{ид}}} \cdot 100\%,$$

где  $T_{\text{ид}}$  — температура в модели без термопары;  $T_{\text{дат}}$  — температура в модели с имитатором сая и соломки.

**Рис. 6.** Погрешность, вносимая в расчет используемой термопарой

Таким образом, анализ методов измерения радиационных тепловых потоков при проведении испытаний материалов и элементов конструкций, подвергаемых интенсивному тепловому воздействию, показал, что погрешность измерения температуры чувствительного элемента датчика не превышает 1,5 %. Этот результат устраняет одну из неопределенностей в задании исходных данных для расчета теплового потока с использованием рассмотренных выше методов.



## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Шейндлин А.Е., ред. *Излучательные свойства твердых материалов*. Москва, Энергия, 1974, 472 с.
- [2] Абрамович Б.Г., Гольдштейн В.Л. *Интенсификация теплообмена излучением с помощью покрытий*. Москва, Энергия, 1977, 256 с.
- [3] Товстоног В.А., Соловов В.А., Щугарев С.Н., Селезнев В.А. Исследование поглощательной способности покрытий тепловоспринимающей поверхности датчика теплового потока. *Промышленная теплотехника*, 1983, т. 5, № 1, с. 81–82.
- [4] Коздоба Л.А., Круковский П.Г. *Методы решения обратных задач теплопереноса*. Киев, Наукова думка, 1982, 358 с.
- [5] Алифанов О.М. *Идентификация процессов теплообмена летательных аппаратов*. Москва, Машиностроение, 1979, 216 с.
- [6] Мишин В.П., ред. *Алгоритмы диагностики тепловых нагрузок летательных аппаратов*. Москва, Машиностроение, 1983, 168 с.
- [7] Мацевитый Ю.М., Прокофьев В.Е., Широков В.С. *Решение обратных задач теплопроводности на электрических моделях*. Киев, Наукова думка, 1980, 132 с.
- [8] Алифанов О.М., Вабищевич П.Н., Михайлов В.В., Ненарокомов А.В., Полежаев Ю.В., Резник С.В. *Основы идентификации и проектирования тепловых процессов и систем*. Москва, Логос, 2001, 400 с.
- [9] Алифанов О.М. *Обратные задачи теплообмена*. Москва, Машиностроение, 1988, 280 с.
- [10] Самарский А.А., Михайлов А.П. *Математическое моделирование: Идеи. Методы. Примеры*. Москва, Физматлит, 2005, 320 с.
- [11] Сергеева Л.А., Сергеев В.Л. Простой метод измерения переменного теплового потока. *Инженерно-физический журнал*, 1977, т. 33, № 1, с. 111–115.
- [12] Сурков Г.А., Юревич Ф.Б., Скакун С.Д. Некоторые исследования в области определения нестационарных тепловых потоков. *Инженерно-физический журнал*, 1977, т. 33, № 6, с. 1078–1084.

Статья поступила в редакцию 06.07.2013



Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Товстоног В.А., Боровкова Т.В., Елисеев В.Н. Анализ погрешностей измерения тепловых потоков при испытаниях конструкций, нагреваемых излучением. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2013, вып. 7.

URL: <http://engjournal.ru/catalog/machin/rocket/851.html>

**Товстоног Валерий Алексеевич** окончил МВТУ им. Н.Э. Баумана в 1971 г. Д-р техн. наук, профессор кафедры «Космические аппараты и ракеты-носители» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 140 научных работ в области исследования процессов теплопереноса в материалах специального назначения, тепловых и теплопрочностных испытаний материалов и конструкций при комплексных воздействиях. e-mail: tovstonv@mail.ru

**Боровкова Татьяна Владимировна** окончила МГТУ им. Н.Э. Баумана в 2004 г. Канд. техн. наук, доцент кафедры «Космические аппараты и ракеты-носителя» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор 11 научных работ в области теплообмена в конструкциях летательных аппаратов. e-mail: tatjana@mail.ru

**Елисеев Виктор Николаевич** окончил МВТУ им. Н.Э. Баумана в 1954 г. Д-р техн. наук, профессор кафедры «Космические аппараты и ракеты-носители» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 150 научных работ в области теплообмена в конструкциях летательных аппаратов. e-mail: v.n.eliseev@gmail.com