

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕПЛООВОГО ПОТОКА К ТЕПЛОЁМКОСТНОМУ (ТАБЛЕТОЧНОМУ) ДАТЧИКУ РЕГУЛЯРНОГО РЕЖИМА ПО ДИСКРЕТНЫМ ЗНАЧЕНИЯМ ЕГО ТЕМПЕРАТУРЫ

Григорович Б.М., Назаренко И.П., Никитин П.В., Сотник Е.В.
Московский авиационный институт (технический университет)

Изложены методы расчета теплового потока к калориметру по дискретным значениям температуры таблеточного теплоёмкостного датчика. Исключена погрешность расчета, связанная с выходом калориметра на регулярный режим.

Для определения теплового потока к поверхности образца от различных источников тепла и, в частности, от высокоэнтальпийных плазменных струй, используются таблеточные калориметрические датчики (рис. 1). Теплоприемным элементом (ТПЭ) калориметра является диск **1**, изготовленный из материала с высокой тепло-

проводностью, как правило, из меди. ТПЭ устанавливается в охлаждаемый корпус **2** и теплоизолируется от него втулкой **3** из материала с низкой теплопроводностью. Диаметр и толщина датчика выбираются из условий эксперимента и составляют, обычно, единицы миллиметров. Температура датчика измеряется термопарой **4**.

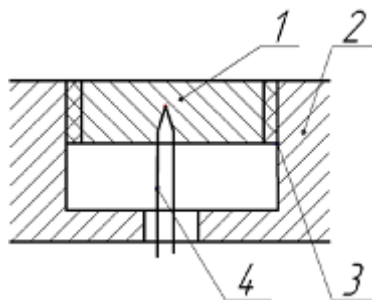


Рис. 1. Схема датчика

До начала измерений калориметр с ТПЭ блокируется шторкой от воздействия теплового потока, чтобы температура датчика T была равна температуре корпуса T_0 . Затем датчик подвергается воздействию исследуемого теплового потока открытием шторки так, чтобы время установления стационарного теплового потока на датчик было минимальным.

Если температура ТПЭ превышает температуру корпуса калориметра, то происходит отток части тепла от датчика в корпус. При этом, поскольку темп нагрева ТПЭ соответствует накоплению тепла в нем, то рассчитанный непосредственно по измеренному темпу нарастания темпера-

туры ТПЭ по времени $\left(\frac{dT}{dt}\right)$ удельный тепловой поток будет меньше подлежащего определению удельного теплового потока, падающего на тепловоспринимающую поверхность датчика.

В эксперименте температура ТПЭ выходит на регулярный режим только после окончания переходного процесса, связанного с конечным временем открытия шторки и прогрева ТПЭ (рис. 2).

Обычно температура датчика регистрируется осциллографом, а удельный тепловой поток определяется по наклону касательной к кривой $T = f(t)$ в точке, соответствующей окончанию переходного процесса, по уравнению

$$q_0 = B \cdot \operatorname{tg} \varphi = B \cdot \frac{\Delta T}{\Delta t}, \quad (1)$$

где q_0 , Вт/м² – удельный тепловой поток к ТПЭ; $B = C_d/S$, [Дж/м²·К] – интегральная теплоёмкость на единицу рабочей площади ТПЭ; C_d , [Дж/град.] – интегральная теплоёмкость датчика, средняя в рабочем интервале температур; S , [м²] – площадь

поверхности датчика, воспринимающей тепловой поток, φ – угол наклона касательной к оси абсцисс; ΔT – повышение температуры ТПЭ на касательной за время Δt .

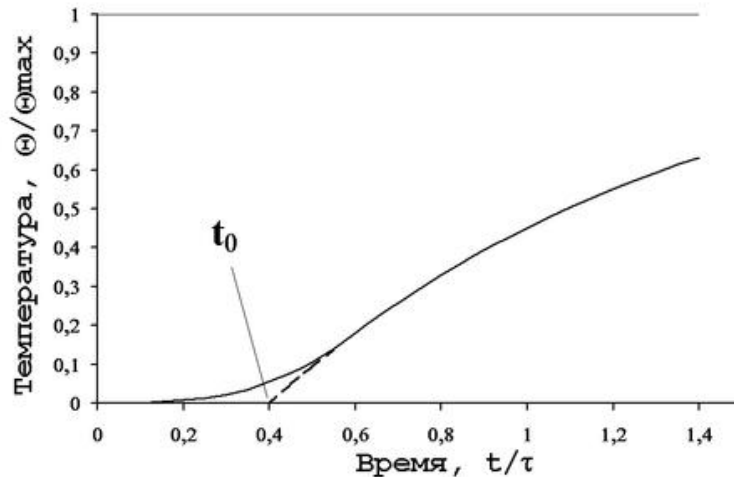


Рис. 2. Изменение температуры датчика по времени в процессе эксперимента

Определенная таким способом величина удельного теплового потока является заниженной. Кроме того, проведение касательной является достаточно субъективным.

Поэтому для повышения точности определения удельного теплового потока целесообразно применять методику его определения, учитывающую теплоотвод от ТПЭ в корпус калориметра и использующую дискретные значения температуры ТПЭ. Последнее тем более актуально в

связи с применением для регистрации температуры датчика и расчета удельного теплового потока ЭВМ.

Алгоритм расчета составлялся в предположении постоянства на ТПЭ теплового потока, температуры корпуса, теплоёмкости материала датчика и коэффициента теплопередачи от датчика в корпус.

В этом случае уравнение баланса для удельного теплового потока, падающего на датчик, будет иметь вид:

$$q_0 = B \frac{dT}{dt} + K \cdot (T - T_0) = B \left(\frac{d\Theta}{dT} + \frac{\Theta}{\tau} \right), \quad (2)$$

где $\Theta = T - T_0$ – избыточная температура датчика; T , [К] – текущее значение температуры датчика; T_0 , [К] – температура датчика до начала воздействия теплового потока (принимается, что она равна температуре корпуса калориметра; K , [Вт/м²·К] –

интегральный коэффициент теплопередачи от датчика в корпус; $\tau = \frac{B}{K}$ [с] – постоянная времени датчика.

Решение уравнения (1) имеет вид:

$$\Theta = \Theta_m \left(1 - e^{-\frac{t-t_0}{\tau}} \right), \quad (3)$$

где $\Theta_m = T_m - T_0$ – максимальное, асимптотическое значение Θ при $t \rightarrow \infty$; t_0 – момент времени для аппроксимирующей зависимости $t = f(T)$, соответствующей уравнению (3), когда $\Theta = 0$; $\tau = \frac{B}{K}$.

Рассмотрим некоторые свойства приведенных уравнений.

Из уравнений (2) и (3) следует, что при $t \rightarrow \infty$, температура датчика

$$\Theta_\infty = \Theta_m = q_0 \frac{\tau}{B}, \quad (4)$$

откуда

$$q_0 = B \frac{\Theta_m}{\tau} \quad (5)$$

Дифференцируя уравнение (3) по времени, получим

$$\frac{d\Theta}{dt} = \frac{\Theta_m}{\tau} e^{-\frac{t-t_0}{\tau}}. \quad (6)$$

Логарифмируя (6), получим линейную зависимость

$$\ln\left(\frac{d\Theta}{dt}\right) = \ln\left(\frac{\Theta_m}{\tau}\right) - \frac{t-t_0}{\tau}. \quad (7)$$

Из уравнения (3) можно найти, что интервал времени от точки t_0 , до i -й точки равен:

$$t_i - t_0 = -\tau \cdot \ln\left(1 - \frac{\Theta_i}{\Theta_m}\right). \quad (8)$$

В начальный момент $t = t_0, \Theta = 0$, и, как следует из уравнения (6), производная

$$\left(\frac{\partial\Theta}{\partial t}\right)_0 = \frac{\Theta_m}{\tau} \quad (9)$$

имеет максимальную величину, а величина удельного теплового потока q_0 , определенная из уравнения (2), также максимальна и соответствует удельному тепловому потоку, поступающему на датчик.

некоторый момент $t_i > t_0$, как уже упоминалось, получаем ошибку, связанную с теплоотводом от датчика в корпус калориметра. Её величина может быть определена из уравнения (6):

При определении q_0 непосредственно по производной температуры по времени в

$$\frac{q_i}{q_0} = \frac{\left(\frac{d\Theta}{dt}\right)_i}{\left(\frac{d\Theta}{dt}\right)_0} = e^{-\frac{t_i-t_0}{\tau}}. \quad (10)$$

Исключить эту ошибку можно, аппроксимируя полученную экспериментальную зависимость $T = f(t)$ уравнением

(3) и используя уравнения (2), (4), (6), (7), (9).

В уравнении (2) константа датчика B определяется по его геометрическим размерам и теплоёмкости материала датчика.

$$B = \frac{\rho V C_{y\partial}}{S} = \frac{\rho S \delta C_{y\partial}}{S} = \rho \delta C_{y\partial}, \frac{\text{Дж}}{\text{м}^2 \text{К}}. \quad (11)$$

В дальнейшем, рассматривая уравнения для описания процесса нагрева датчика, примем $t_0 = 0$ и $t - t_0 = \Theta$.

Величину постоянной времени датчика τ можно получить, зная величину

$\left(\frac{dT}{dt}\right)$ в двух точках и используя уравнение (7).

$$Z = -\frac{\Delta t}{\Delta \ln\left(\frac{d\Theta}{dt}\right)} = \frac{t_2 - t_1}{\ln\left(\frac{d\Theta}{dt}\right)_1 - \ln\left(\frac{d\Theta}{dt}\right)_2} = \frac{t_2 - t_1}{\ln\left(\frac{dT}{dt}\right)_1 - \ln\left(\frac{dT}{dt}\right)_2}. \quad (12)$$

Такой способ определения постоянной времени τ с использованием логарифма производной температуры по времени целесообразно применять при обработке данных на ЭВМ, когда можно работать с большим массивом точек и производить сглаживание полученных экспериментальных зависимостей.

Можно также найти величину τ , имея только три измеренные величины температуры датчика $\Theta_1, \Theta_2, \Theta_3$ в три момента времени: $t_1, t_2 = t_1 + \Delta t$, и $t_3 = t_1 + 2\Delta t$, по уравнению, полученному с использованием (3):

$$x \equiv \frac{\Theta_2 - \Theta_1}{\Theta_3 - \Theta_2} = e^{\frac{\Delta t}{\tau}}, \quad (13)$$

откуда постоянная времени нагрева датчика

$$\tau = \frac{\Delta t}{\ln x}. \quad (14)$$

Этот способ, в частности, целесообразно применять при обработке зависимости $\Theta = f(t)$, полученной записью на осциллограф.

Таким образом, для определения падающего на датчик теплового потока по уравнению (2) осталось найти величину $\left(\frac{d\Theta}{dt}\right)$ и Θ в какой-то момент времени, например, при $t = t_2$.

В первом случае, когда из первичной обработки массива экспериментальных данных на ЭВМ имеются зависимости $\ln\left(\frac{d\Theta}{dt}\right) = f(t)$ и $\Theta = f(t)$, указанные величины определяются непосредственно из них с использованием операции потенцирования.

Во втором случае, когда удельный тепловой поток к датчику определяется по значениям температуры датчика в трех

точках по времени, используется следующая методика.

Определяется средняя величина относительного приращения температуры на участках 1..2 и 2...3: $\frac{\Delta T_{12}}{\Delta t} = \frac{T_2 - T_1}{\Delta t}$ и

$\frac{\Delta T_{23}}{\Delta t} = \frac{T_3 - T_2}{\Delta t}$, затем, в первом приближении, величина

$$\left(\frac{dT}{dt}\right)_2^{(1)} = \frac{\Delta T_{12} + \Delta T_{23}}{2\Delta t} = \frac{T_3 - T_1}{2\Delta t}$$

как средняя величина относительных приращений температуры датчика на участках 1...2 и 2...3.

Далее определяется, в первом приближении, тепловой поток, падающий на датчик

$$q_0^{(1)} = B \left(\left(\frac{dT}{dt}\right)_2^{(1)} + \frac{\Theta_2}{\tau} \right) \quad (15)$$

и рассчитываются следующие приближения:

По уравнению (4) находится

$$\Theta_m^{(1)} = q_0^{(1)} \frac{\tau}{B}. \quad (16)$$

Затем по уравнению (7), учитывая, что принято $t_0 = 0$, находим t_1 и t_2 :

$$t_1^{(1)} = -\tau \cdot \ln \left(1 - \frac{\Theta_1}{\Theta_m^{(1)}} \right), \quad (17)$$

$$t_2^{(1)} = t_1^{(1)} + \Delta t \quad (18)$$

Далее находим во втором приближении:
по уравнению (6) – производную избыточной температуры по времени для точки 2

$$\left(\frac{d\Theta}{dt} \right)_2^{(2)} = \frac{\Theta_m^{(1)}}{\tau} \cdot e^{-\frac{t_2}{\tau}}, \quad (19)$$

по уравнению (1) – удельный тепловой поток

$$q_0^{(2)} = B \left[\left(\frac{d\Theta}{dt} \right)_2^{(2)} + \frac{\Theta_2}{\tau} \right]. \quad (20)$$

Вычисления (17)...(20) повторяются до получения заданной сходимости по q_0 .

Заключение

1. Предложен метод математической обработки экспериментальных данных при расчете удельного теплового потока, измеряемого калориметром таблеточного типа, по дискретным значениям температуры его ТПЭ в функции от времени. Это позволяет повысить точность определения удельного теплового потока при калориметрировании высокотемпературных струй на 10...15% за счет учета теплоотвода от ТПЭ в корпус.

2. На базе предложенного метода составлен алгоритм расчета теплового потока, который может быть использован в автоматических системах регистрации и обработки экспериментальных данных.

3. Предлагаемый метод позволяет оценить величину постоянной времени

ТПЭ калориметра, которая используется как при его разработке, так и при выборе режима измерений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Никитин П.В. Тепловая защита [Текст] // Учебник высшей школы. – М.: Изд. МАИ, 2006.
2. Кондратьев Г.М. Тепловые измерения [Текст] – М., Л.: Машгиз, 1957.
3. Физика и техника низкотемпературной плазмы [Текст] / Под общей редакцией С.В. Дресвина – М.: Атомиздат, 1972.
4. Гутер Р.С., Овчинский Б.В. Элементы численного анализа и математической обработки результатов опыта [Текст] – М.: Наука, 1969.

HEAT FLOW DETERMINATION TO HEAT CAPACIOUS (TABLET) STEADY REGIME DETECTOR ELEMENT ON ITS TEMPERATURE DISCRETE VALUES

Grigorovich B.M., Nazarenko I.P., Nikitin P.V., Sotnik Ye.V.

Moscow aviation institute (technical university)

Procedures of calculation of heat flow to calorimeter by discrete meanings of tabletted sensor temperature in regular conditions are described. The error of heat flow determination, caused with reaching of calorimeter to regular working, is excluded.

