

УДК 536.6, 544.332

МОДЕЛЬ КОРРЕКТИРУЮЩЕГО ЗВЕНА ДЛЯ УМЕНЬШЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКОЙ ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ЯЧЕЙКИ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОГО СКАНИРУЮЩЕГО КАЛОРИМЕТРА

*А.С. Нечаев, Р.Р. Хуснутдинова, И.Н. Нечаева, Е.А. Дмитриева,
В.Н. Митрошин*

Самарский государственный технический университет
Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

Рассматривается вопрос уменьшения динамической погрешности измерений тепловых характеристик вещества при протекании в нем эндо- и экзотермических реакций путем коррекции информационного сигнала в дифференциальном сканирующем калориметре (ДСК). С помощью метода тепловых эквивалентов было получено уравнение для корректирующего звена в операторном виде. Полученная зависимость отражает основные тепловые инерционности частей измерительного блока и расход тепловой энергии в окружающее пространство. Данное уравнение позволяет предложить электрическую схему для коррекции сигнала, пришедшего с первичных преобразователей, аппаратным способом в измерительном блоке ДСК, что обеспечивает уменьшение влияния динамической погрешности на процесс измерения.

Ключевые слова: *дифференциальный сканирующий калориметр, динамическая погрешность, модель, метод тепловых эквивалентов, коррекция сигнала.*

Измерительный блок дифференциального сканирующего калориметра (ДСК) включает в себя ряд элементов, влияющих на процесс распространения тепла внутри него. Под элементами здесь можно понимать как конструктивные части блока (нагревательный элемент, подложка, измерительная ячейка, датчик температуры), так и неотъемлемую часть проведения реального эксперимента – воздушную среду в рабочем пространстве печи.

Процесс измерения дифференциальной температуры заключается в одновременном снятии показаний датчиков, расположенных в измерительных ячейках с исследуемым и эталонным образцами. Ячейки считаются равноудаленными от нагревателя и симметричными относительно центра рабочей области измерительного блока. Это допущение позволяет утверждать, что при равных геометрических размерах проводящих сред и равномерном тепловом потоке температура в измерительных ячейках будет равна в каждый момент времени эксперимента, а следовательно, дифференциальная температура определяется нулевой. Нарушение какого-либо условия симметричности ведет, соответственно, к ненулевому показателю разностной температуры. Данная процедура измерения дает возможность исследовать,

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант 16-08-00252 А).

Александр Сергеевич Нечаев (к.т.н.), доцент кафедры «Радиотехнические устройства».

Резеда Рамильевна Хуснутдинова, магистрант.

Ирина Николаевна Нечаева, аспирант.

Елизавета Анатольевна Дмитриева, аспирант.

Владимир Николаевич Митрошин (д.т.н.), заведующий кафедрой «Автоматика и управление в технических системах».

например, процессы теплового выделения или поглощения при фазовом переходе в веществе во время его нагрева, исключая влияние внешних возмущений, воздействующих на всю систему.

Кроме задач анализа экзотермических и эндотермических реакций при фазовом переходе вещества нередко ставится вопрос определения его динамической теплоемкости. Одним из способов косвенного измерения данного параметра является периодическое выдерживание показателя температуры измерительной ячейки в процессе нагрева в течение некоторого времени. Вследствие этого можно оценить теплоемкость исследуемого вещества по инерционности его перехода в установившееся температурное состояние.

Практическое решение данной задачи возможно при регулировании теплового потока, идущего от нагревателя, по закону, приведенному на рис. 1, где q_c является тепловым потоком, определяющим скорость нагрева ячейки до поставленной температуры, а q_0 – тепловым потоком, необходимым для поддержания температуры ячейки на заданном уровне.

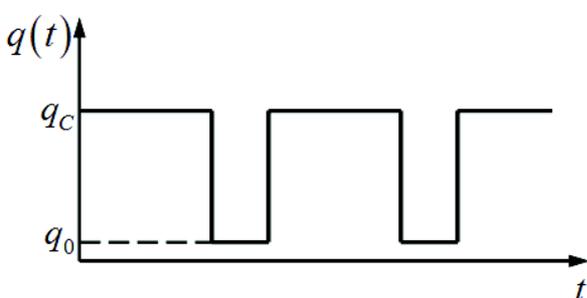


Рис. 1. Закон изменения теплового потока

Нагреватель и измерительная ячейка расположены на некотором расстоянии друг от друга. Это приводит к потере тепла при его передаче от нагревателя к ячейке в окружающее пространство и на нагрев элементов измерительного блока. Таким образом, необходимо регулировать процесс выделения теплового потока от нагревателя с учетом указанных потерь. Закон регулирования теплового потока в данном случае должен опираться на модель процесса распространения тепла в

измерительном блоке.

Модель процесса изменения температуры в заданной точке измерительного блока может быть получена с помощью метода эквивалентных тепловых схем. Данный метод основан на использовании аналогии теплового потока $q(t)$ и электрического тока $I(t)$ ввиду подобия формы закона Фурье (1) и закона Ома (2) [1, 2]:

$$q(t) = \frac{\lambda \cdot F_T \cdot \Delta\theta(t)}{\delta} = \frac{\Delta\theta(t)}{R_T}; \quad (1)$$

$$I(t) = \frac{k \cdot F_{ПП} \cdot \Delta U(t)}{l} = \frac{\Delta U(t)}{R_{\mathcal{E}}}, \quad (2)$$

где λ – коэффициент теплопроводности;
 k – удельная электрическая проводимость;
 F_T – площадь сечения, перпендикулярная распространению тепла;
 $F_{ПП}$ – сечение токопроводящего проводника;
 $\Delta\theta(t)$ – изменение температуры среды на расстоянии δ от источника тепла;
 $\Delta U(t)$ – изменение разности потенциалов на длине проводника l ;
 R_T и $R_{\mathcal{E}}$ – тепловое сопротивление данного участка и электрическое сопротивление соответственно.

На рис. 2 схематично отражены составляющие теплового баланса в измерительной ячейке печи ДСК. Из рисунка видно, что тепловой поток, формируемый нагревателем печи, расходуется при распространении его через металлическую подложку к тиглю с образцом $Q_{П}$ на нагрев самого образца $Q_{ОБ}$, также часть тепла поглощается окружающим пространством через конвекцию $Q_{КОН}$ и тепловое излучение $Q_{ИЗЛ}$. В ходе измерения температуры образца датчиком (термопарой) часть тепловой энергии расходуется непосредственно на нагрев самого термодатчика $Q_{Д}$ и отвод тепла через него.

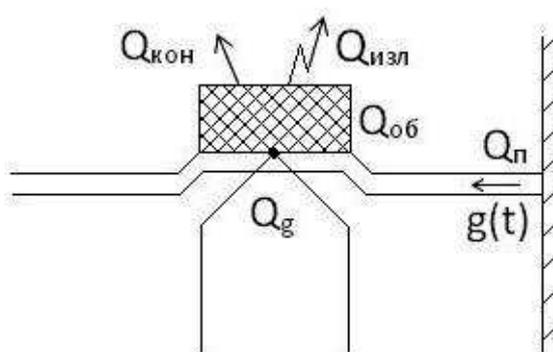


Рис. 2. Схематичное представление составляющих теплового баланса в измерительной ячейке ДСК

Метод эквивалентных тепловых схем подразумевает возможность замены тепловых характеристик системы эквивалентными электрическими параметрами. В работе [1] указано, что аналогом теплоемкости можно считать электрическую емкость, а тепловому сопротивлению – электрическое. Анализируя принципы распространения тепла в измерительном блоке, примем следующие гипотезы:

- тепло, распространяющееся от нагревателя к ячейке, формируется с учетом инерционности, связанной с теплоемкостью и тепловым сопротивлением металлической подложки;

- образец вещества в тигле нагревается инерционно, поскольку имеет определенную массу, размеры и теплоемкость;

- потери тепла в окружающее пространство посредством свободной конвекции несущественны, что определяется относительно малыми объемами свободного пространства в печи;

- потери тепла, вызванные эффектом излучения, не имеют существенной зависимости от теплоемкости газовой среды, а связаны только с ее тепловым сопротивлением [3];

- термодатчик является инерционным звеном, имеющим свое тепловое сопротивление и теплоемкость.

С учетом приведенных гипотез была предложена электрическая модель, эквивалентная тепловой модели распространения тепла от нагревателя к измерительной ячейке (рис. 3). В ней элементы $R_{П}$ и $C_{П}$ определяют модель теплового поведения металлической подложки измерительного блока, $R_{ИЗЛ}$ – показатель сопротивления газовой среды в зависимости от интенсивности излучения, $R_{ОБ}$ и $C_{ОБ}$ характеризуют тепловую модель поведения тигля с исследуемым образцом, $R_{Д}$ и $C_{Д}$ определяют инерционность термодатчика.

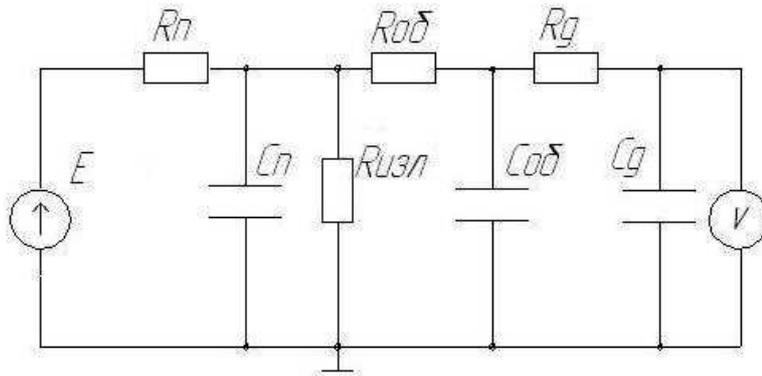


Рис. 3. Эквивалентная электрическая модель

Полученная эквивалентная электрическая модель позволяет получить передаточную функцию инструмента исследования $W_{И}(p)$, а именно каналов утечки тепла – нагрев подложки, тепловое излучение и инерционность датчика:

$$W_{И}(p) = \frac{[R_{ИЗЛ} / (R_{ИЗЛ} + R_{\Pi})]}{[R_{ИЗЛ} R_{\Pi} C_{\Pi} / (R_{ИЗЛ} + R_{\Pi})] p + 1} \cdot \frac{1}{R_{Д} C_{Д} p + 1}. \quad (3)$$

Данная модель позволяет воспользоваться методом аппаратной коррекции динамической погрешности в ДСК для установления характеристик исследуемого объекта. Из возможных способов подключения корректирующего звена [4] в данном случае наиболее подходящим с точки зрения простоты практической реализации можно считать последовательное подключение к термодатчику. При такой реализации передаточная функция скорректированного звена будет иметь вид

$$W_{К}(p) = W(p) \cdot W_{КЗ}(p) = \frac{1}{R_{ОБ} C_{ОБ} p + 1}, \quad (4)$$

где $W(p)$ – передаточная функция всей системы, приведенной на рис. 3; $W_{КЗ}(p)$ – передаточная функция корректирующего звена, которая в условиях поставленной задачи должна скорректировать влияние инструмента исследования на процесс измерения, а значит, будет выражаться как $1/W_{И}(p)$.

Из вида уравнения (3) следует, что передаточная функция корректирующего звена должна представлять собой последовательное соединение двух идеальных форсирующих звеньев типа $W_{\Phi}(p) = Tp + 1$. Реализация таких звеньев физически невозможна, однако использование схем с передаточными функциями вида $(T_1 p + 1)/(T_2 p + 1)$ при условии $T_1 \ll T_2$ может с заданной мерой точности считаться форсирующим. В таком случае передаточная функция корректирующего звена может быть представлена как

$$W_{КЗ}(p) = \frac{[R_{ИЗЛ} R_{\Pi} C_{\Pi} / (R_{ИЗЛ} + R_{\Pi})] p + 1}{[R_{ИЗЛ} / (R_{ИЗЛ} + R_{\Pi})] [T_{\Pi} p + 1]} \cdot \frac{R_{Д} C_{Д} p + 1}{T_{Д} p + 1}, \quad (5)$$

где T_{Π} и $T_{Д}$ – постоянные времени инерционных составляющих реальных форсирующих звеньев, намного меньших значений $R_{ИЗЛ} R_{\Pi} C_{\Pi} / (R_{ИЗЛ} + R_{\Pi})$ и $R_{Д} C_{Д}$ соответственно.

Таким образом, при измерении количества выделившегося или поглощенного при фазовом переходе тепла в исследуемом веществе, а также определении его ди-

намической теплоемкости для уменьшения влияния динамической погрешности можно использовать электрическую схему корректирующего звена, имеющую передаточную функцию (5), подключенную последовательно к термодатчику.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Alaoui C.* Peltier Thermoelectric Modules Modeling and Evaluation / International Journal of Engineering (IJE). – Volume (5): Issue (1). – 2011. – p. 114–121.
2. *Кузнецов В.П., Скоробогатов А.С., Горгоц В.Г.* Математическая модель теплофизики двухконтурной теплоотводящей системы инструмента для наноструктурирующего выглаживания деталей // Сборник трудов Межд. науч.-практ. конф. «Актуальные проблемы современного машиностроения». Секция 2: Математическое моделирование прикладных задач. – 2014. – С. 149–155.
3. *Мощенский Ю.В., Нечаев А.С., Макаров И.В.* Распространение тепла в печи дифференциально-сканирующего калориметра // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. – 2015. – № 2(46). – С. 99–105.
4. *Зори А.А.* Теория, методы и средства повышения точности информационно-измерительных систем вертикального зондирования океана: Автореф. дис. ... докт. техн. наук: 05.11.16 // – СПб.: ЛЭТИ им. В.И. Ульянова (Ленина), 1992. – 34 с.

Статья поступила в редакцию 19 августа 2016 г.

MODEL TO REDUCE CORRECTION LINK DYNAMIC INACCURACY OF THE MEASURING CELL DIFFERENTIAL SCANNING CALORIMETER

A.S. Nechaev, R.R. Khusnutdinova, I.N. Nechaeva, E.A. Dmitrieva, V.N. Mitroshin

Samara State Technical University
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russian Federation

This paper considers the question of reducing the dynamic error of measurement of thermal characteristics of the substance during the flow of it endothermic and exothermic reactions, by correcting the information signal in a differential scanning calorimeter (DSC). Using the method of the thermal equivalent equation was obtained for the correction level in operator form. The resulting dependence reflects the major thermal inertia of the parts of the measuring unit and consumption of thermal energy in the surrounding space. This equation allows us to offer an electrical circuit for signal correction, coming from primary converters in hardware in the measuring unit DSC, reducing dynamic error effect on the measurement process

Keywords: differential scanning calorimeter, dynamic error model, the method of thermal equivalents, correction signal.

*Alexander S. Nechaev (Ph.D. (Techn.)), Associate Professor.
Rezeda R. Khusnutdinova, Graduate student.
Irina N. Nechaeva, Postgraduate Student.
Elizaveta A. Dmitrieva, Postgraduate Student.
Vladimir N. Mitroshin (Dr. Sci. (Techn.)), Professor.*