

## ОЦЕНКА ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК НЕСТАЦИОНАРНЫХ ПРОЦЕССОВ

Линейцев А.В.

Руководитель: д.х.н. Павлов В.Ф.

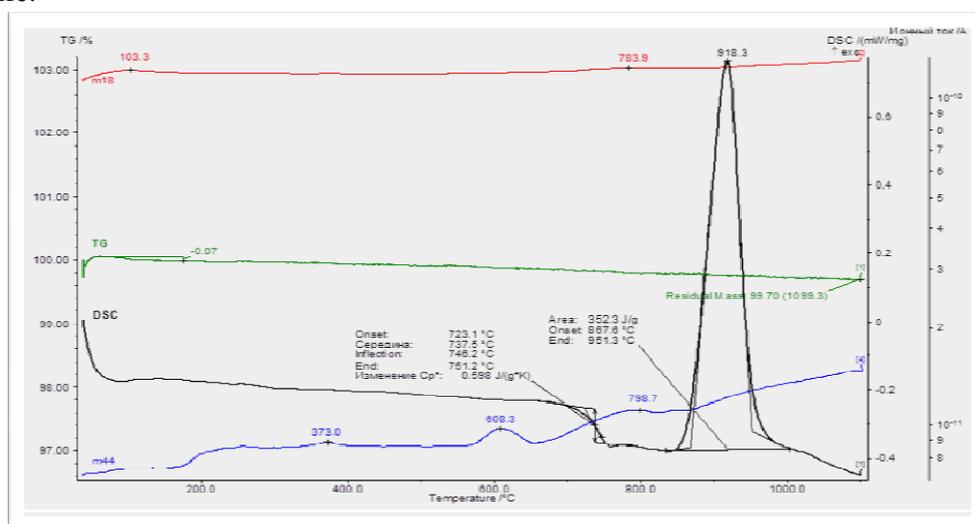
*Специальное конструкторско-технологическое бюро "НАУКА" КНЦ СО РАН*

При исследовании явления самораспространяющейся кристаллизации в форме видимого распространения фронта в объёмных керамических материалах, основной задачей является исследование тепловой и структурной динамики с использованием контактных и бесконтактных методов диагностики. При исследовании тепловой динамики характеристическими параметрами являются температура фронта кристаллизации и скорость его распространения.

Тепловая инерция всякого термopриёмника зависит от его конструкции и массы и может явиться серьезным препятствием при проведении измерений на объектах с высокими скоростями измерения температур. Одна из основных задач при контактном измерении температуры заключается в определении истинной температуры  $T_{cp}$ , по измеренной температуре  $T_{пр}$ , т.е. состоит в оценке величины суммарной погрешности измерения, оценки достоверности полученных при измерениях результатов.

Возникает также и обратная задача - подбор измерительного комплекса с такими параметрами, при которых погрешность температурных измерений в данных условиях не превышала бы заранее заданной допустимой величины.

Анализируя данные DSC (рис.1) образца аморфного пеносиликата состава диопсида, можно сделать вывод о «взрывном выделении» скрытой теплоты кристаллизации при переходе пеносиликата из аморфного в кристаллическое состояние.



**Рисунок 1.** График DSC аморфного пеносиликата состава диопсида

Для простоты анализа измерительной системы входные воздействия на термopриёмник  $X(t)$  приведём к одному из типовых видов – единичное ступенчатое воздействие.

Наиболее доступным и надежным методом оценки динамических свойств термопреобразователей является экспериментальный метод.

При некоторых допущениях можно считать, что рассматриваемый датчик температуры представляет собой линейный элемент. Это позволяет довольно просто получить его передаточную функцию по экспериментальным временным характеристикам.

Экспериментальные исследования термопреобразователей проводятся при соблюдении следующих условий:

1. Перед опытом в термопреобразователе устанавливается постоянное температурное поле.
2. Началу опыта соответствует скачкообразное изменение температуры среды, которая в дальнейшем остается постоянной, т. е. для времени

$$t_1 < 0, T_{c1} = const$$

$$t_2 > 0, T_{c2} = const$$

3. Максимальное изменение температуры среды ограничено.

Зная передаточную функцию датчика температуры и закон изменения входной температуры (температуры среды), можно легко получить закон изменения выходной температуры датчика.

При скачкообразном изменении температуры среды:

$$T_c = \begin{cases} 0, \text{при } \tau \leq 0 \\ A, \text{при } \tau \geq 0 \end{cases}$$

переходная функция простейшего термопреобразователя будет иметь вид:

$$T_T(t) = A(1 - e^{-\frac{t}{T_1}})$$

Отсюда легко получить динамическую погрешность простейшего термопреобразователя, обусловленную его инерционностью:

$$\Delta T_T(\tau) = Ae^{-\frac{\tau}{T_1}}$$

Как следует из приведённых уравнений, погрешность измерений температуры меняется со временем от максимальной при  $\tau=0$  и стремится к нулю при  $\tau \rightarrow \infty$ . Определяющее влияние на величину ошибки измерения оказывает параметр  $\varepsilon_0 = T_1$ , имеющий размерность времени.

Пусть с момента начала измерений прошло время  $\tau=T_1$  тогда из уравнений имеем:

$$\frac{\Delta T_T(T_1)}{A} = e^{-1} = \frac{1}{e} \approx 0,368$$

Следовательно, величина  $\varepsilon_0$  численно равна интервалу времени, по истечению которого разность между температурой среды и термоприёмника составляет 0,368 от первоначальной разности.

Чем меньше  $\varepsilon_0$ , тем быстрее реагирует термоприёмник на изменение температуры среды, с ростом  $\varepsilon_0$  реакция термоприёмника замедляется.

Промежуток времени  $\tau_{уст}$  называется временем установления показаний прибора, временем выдержки или временем недохода.

$$\Delta T_T(\tau_{уст}) = A \cdot 0,05$$

$$\tau_{уст} = 3T_1 = 3\varepsilon_0$$

Т.е. температура термоприёмника отличается от температуры среды всего на 5%, что является достаточной точностью при проведении теплотехнических измерений.

Основываясь на вышеизложенных теоретических предпосылках, первый вопрос, который мы должны решить это какая тепловая инерция нашего термopриёмника допустима в нашем случае, при измерении температуры фронта кристаллизации аморфного пеносиликата состава диопсида.

Зададим начальные и граничные условия для определения допустимой величины  $\epsilon_0$ .

1. Максимальная погрешность измерения 5%
2. Начальная температура образца  $T_n=900^{\circ}\text{C}$
3. Ступенчатое воздействие при выделении скрытой теплоты кристаллизации.
4. Ширина импульса воздействия  $\tau_n=1,5$  сек
5. Температура фазового перехода  $T_k=1100^{\circ}\text{C}$

$$\frac{T_k - T_{\max}}{T_k - T_n} = 0,05$$

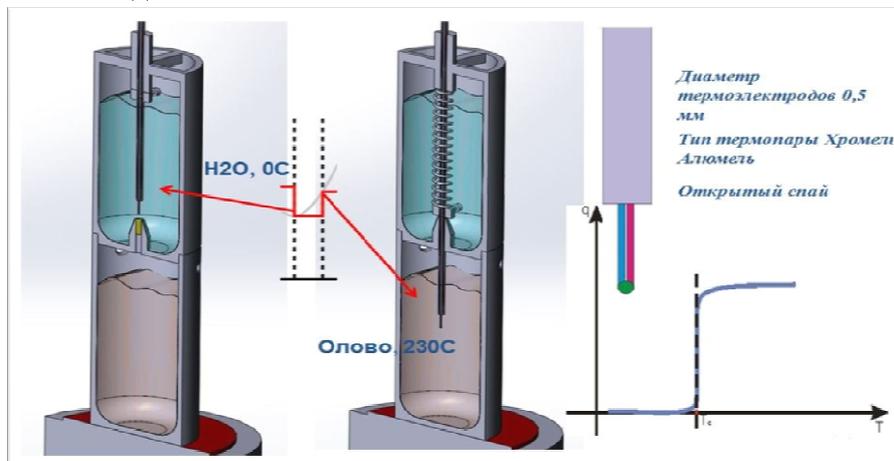
$$T_{np}(\tau) = T_k - (T_k - T_n) \cdot e^{\left(\frac{-\tau}{\epsilon_0}\right)}$$

$$T_{np}(\tau) = T_k - (T_k - T_n) \cdot e^{\left(\frac{-\tau}{\epsilon_0}\right)}$$

$$\epsilon_0 = \epsilon_{\max} = 0,5 \text{ сек}$$

Определение динамических характеристик объектов по кривой разгона производится методом касательной к точке перегиба переходной характеристики (кривой разгона). В данном случае точка перегиба соответствует переходу кривой от режима ускорения к режиму замедления темпа нарастания выходного сигнала. Т.е. построив кривую переходного процесса, можно определить постоянную времени термопреобразователя по производной (касательной к кривой) в начальный момент времени (точка перегиба в нашем случае). Значение постоянной времени будет равно длине отрезка на линии входного воздействия, начало которого – точка пересечения с осью ординат, а конец – точка пересечения с линией – производной в начальный момент времени.

Получение массива данных экспериментальных точек в настоящем исследовании производилось на разработанной лабораторной установке собственной конструкции включающей в себя устройство быстрого перемещения (ступенчатого воздействия температуры окружающей среды) термопреобразователя из среды с низкой температурой в среду с более высокой температурой (рис 5.), цифроаналогового преобразователя ZET LAB 210, и персонального компьютера для первичной обработки экспериментальных данных.



**Рисунок 5.** Устройство для определения тепловой инерции термопреобразователей.

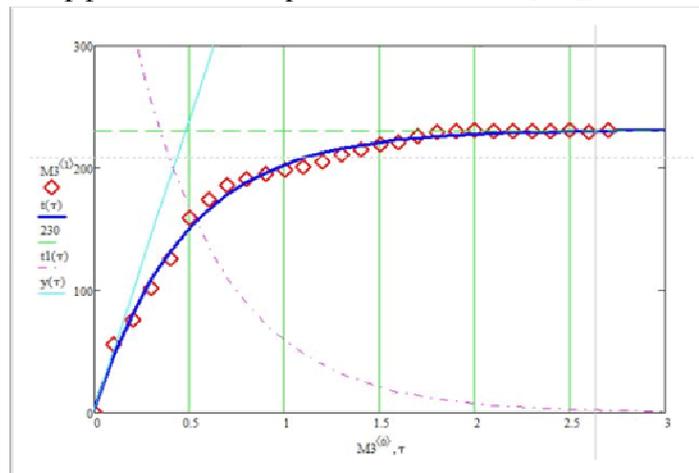
Аппроксимацию экспериментальных данных методом наименьших квадратов выполним, используя программу MathCAD. Выполняем функцию  $\text{exrfit}(\dots)$ , определяющую коэффициенты аппроксимации по методу наименьших квадратов для экспоненциальной функции вида:

$$T_{np}(\tau) = C_2 + C_0 \cdot e^{C_1 \tau}$$

представляющую собой уравнение переходной характеристики термопреобразователя.

$$\left. \frac{dT_{np}(\tau)}{d\tau} \right|_{\tau=0} = C_0 \cdot C_1 \cdot e^{C_1 \tau} = C_0 \cdot C_1 = \frac{T_{cp}(\tau) - T_0}{\varepsilon}$$

Функция имеет три аргумента: 1-й – вектор независимой переменной (в нашем случае – вектор моментов времени); 2-й – вектор зависимой величины (температуры); 3-й – вектор начальных значений коэффициентов аппроксимации. Функция реализует итерационную процедуру поиска коэффициентов аппроксимации, поэтому требует задания вектора начальных значений коэффициентов. Результат работы функции  $\text{exrfit}(\dots)$  – вектор коэффициентов аппроксимации  $C_0, C_1, C_2$ .



**Рисунок 4.** Графики экспериментальных точек и аппроксимирующей кривой, где  $M3$  – экспериментальные точки;  $t(\tau)$  – аппроксимирующая переходный процесс экспоненциальная кривая;  $y(\tau)$  – касательная в точке начала переходного процесса

Графическая интерпретация численного решения и график аппроксимирующей кривой переходного процесса представлен на рисунке 4.

Как следует из полученного решения, постоянная времени переходного процесса для полученных экспериментальных данных равна 0,481с.

Максимально возможное значение тепловой инерции термоприемника, для обеспечения погрешности измерений не более 5%, равно 0,5 сек.

На основании проведенных вычислений можно сделать вывод что, применяемая при проведении экспериментов измерительная система позволяет получать результаты с относительной погрешностью менее 5%.

### Литература:

1. Н.А. Ярышев. Теоретические основы измерения нестационарной температуры. 2-е издание. – Л.: Энергоатомиздат, 1990. – 256 с.
2. А.В. Линейцев. Кристаллизация рентгенноаморфных Са-Mg-алюмосиликатных материалов.- Журнал физика и химия стекла.-2009.-том.-35 №5.-стр.-125-131.