

**ПРОГРАММНО-АППАРАТНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ АНАЛИЗА  
ТЕМПЕРАТУРНОГО ПРОФИЛЯ ВОЛНЫ ГОРЕНИЯ ГКС**

*Климентьева Ю. И., Королев Д. В., Панов И. А., Суворов К. А.*

С-Петербургский государственный технологический институт

(технический университет)

Наиболее полное представление о процессе распространения волны горения в гетерогенных конденсированных системах (ГКС) дает температурный профиль. По нему можно определить зоны горения, теплофизические параметры в каждой зоне, температуру самовоспламенения, функцию тепловыделения и кинетические параметры. По виду температурного профиля можно судить о механизме процесса горения.

Цель работы — создание программно-аппаратного комплекса для снятия и последующей математической обработки температурного профиля волны горения ГКС.

Разработанный программно-аппаратный комплекс состоит из экспериментальной установки для снятия температурного профиля и программы математической обработки.

Установка для снятия температурного профиля включает в себя термопару, плату усиления сигнала, аналогово-цифровой преобразователь сигнала и компьютер.

В качестве аналого-цифрового преобразователя (АЦП) используется плата фирмы National Instruments PC LPM-16 обеспечивающая частоту оцифровки сигнала до 50 кГц [i].

Программа математической обработки позволяет: принимать информацию с АЦП; выбирать информативный участок кривой; определять ширину зон горения; рассчитывать теплофизические характеристики вещества в каждой зоне; определять температуру самовоспламенения в установившемся режиме горения; рассчитывать

функцию тепловыделения; определять кинетические параметры процесса горения; выводить на экран исходный температурный профиль и графическую интерпретацию промежуточных и конечных результатов расчетов.

В процессе математической обработки исходного температурного профиля осуществляется: удаление шумов путем сглаживания; двойное дифференцирование информативного участка сигнала.

Сглаживание информативного участка кривой проводится с применением полинома [ii] либо сплайна [iii]. Наилучшие результаты случайно и синусоидально зашумленных тестовых кривых получаются при сглаживании кубическим сплайном. При этом веса точек задаются одинаковыми. Аналогичные результаты получаются при обработке экспериментальных данных.

При дифференцировании информативного участка данные аппроксимируются кубическим сплайном, после чего вычисляются его производные в каждой точке.

Температура самовоспламенения ( $T_{ce}$ ) в установившемся режиме горения определяется, исходя из максимума первой производной на информативном участке кривой.

Функция тепловыделения и кинетические параметры процесса горения рассчитывается по методике [iv]. Экспериментальные значения степени превращения и тепловыделения в каждой точке определяются из системы уравнений

$$\begin{cases} d(\lambda \cdot dT / dx) / dx - m \cdot c \cdot dT / dx + \Phi = 0 \\ -m \cdot d\alpha / dx + \Phi / Q = 0 \\ \lambda = \lambda_k \cdot \eta - \lambda_n \cdot (1 - \alpha) \end{cases},$$

где  $m$  — массовая скорость горения ГКС;  $c$  — средняя теплоемкость системы в исследуемом интервале температур;  $T_i$ ,  $T_0$  — текущая и начальная температура;  $\lambda_n$ ,  $\lambda_k$  — теплопроводность состава и продуктов сгорания;  $x_i$  — координата;  $Q$  — тепловой эффект реакции горения;  $\alpha$  —

степень превращения;  $\Phi_i$  — значение функции тепловыделения.

Решение этой системы выглядит следующим образом

$$\alpha_i = (m c (T_i - T_0) - \lambda_k c (dT/dx)_i) / ((\lambda_k - \lambda_n) (dT/dx)_i + Q m)$$

$$\Phi_i = m Q (d\alpha/dx)_i.$$

Кинетические параметры — энергия активации ( $E$ ) и предэкспонента ( $K_0$ ) определяются методом наименьших квадратов из уравнения

$$\Phi_i = Q K_0 f(\alpha_i) \exp(-E/RT_i),$$

где  $f(\alpha_i)$  — значение функции степени превращения.

В качестве функции  $f(\alpha_i)$  выбрано наиболее характерное для процессов горения уравнение

$$f(\alpha_i) = 1/\alpha_i^n,$$

где  $n$  — показатель степени.

Тестирование программной обработки осуществлено по аналитической функции [4]

$$T(x) = (C A \exp(\mu x)) / (1 + C \exp(\mu x)),$$

где  $A$  — “размах” температурного профиля по температуре;  $\mu$  — “крутизна” подъема температуры;  $C$  — задает форму профиля ( $C = 0.1$ ,  $T = T_{min} \dots T_{max}$ ;  $C = 1.0$ ,  $T = T_{св} \dots T_{max}$ ;  $C = 0.003$ ,  $T = T_{min} \dots T_{св}$ ). Тестовый профиль зашумлялся, сглаживался, затем производился поиск кинетических параметров. Анализ полученных величин кинетических параметров для различных участков температурного профиля показал, что сопоставимость с литературными данными дает лишь полная температурная кривая.

Основным достоинством разработанного программно-аппаратного комплекса является возможность снятия температурных профилей быстротекающих процессов горения и большая информативность получаемых данных.

- 
- i. PC-LPM-16/PnP User Manual. — National Instruments Corporation, 1996.
  - ii. Джонсон К. Численные методы в химии. — М.: Мир, 1983. — 504 с.
  - iii. Носач В. В. Решение задач аппроксимации с помощью персональных компьютеров. — М.: МИКАП, 1994. — 328 с.
  - iv. Зенин А. А., Нерсиян Г.А. Тепловая структура волны СВС, механизм и макрокинетика в системах Ti-Si и Zr-Si. Черноголовка, 1980 — 26 с.