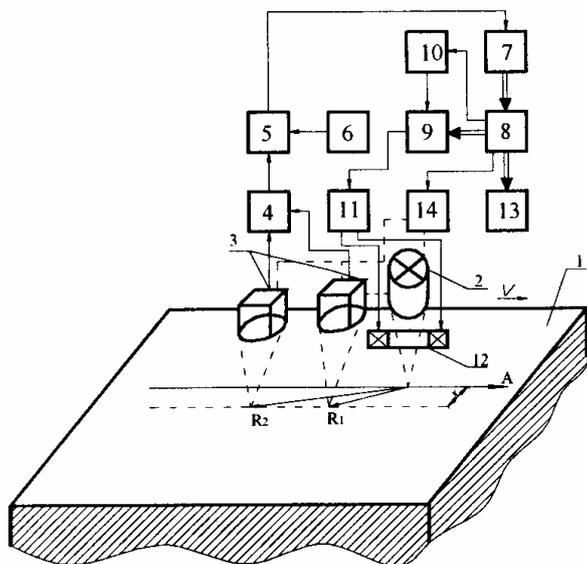


### АНАЛИЗ ПОГРЕШНОСТЕЙ БЕСКОНТАКТНОГО МЕТОДА НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ ТФХ МАТЕРИАЛОВ

Разработан бесконтактный частотно-импульсный по тепловому воздействию метод неразрушающего контроля (НК) теплофизических характеристик (ТФХ) материалов, сущность которого заключается в следующем [1].

**Рис. 1** Схема устройства, реализующего бесконтактный метод НК ТФХ материалов



Над исследуемым объектом 1 (рис. 1) помещают точечный источник тепловой энергии 2 (лазер) и термоприемник 3, сфокусированный на поверхность, подверженную тепловому воздействию, и регистрирующий температуру этой поверхности по ее электромагнитному излучению. Первоначально термоприемник фокусируют в точку поверхности исследуемого объекта, находящуюся на расстоянии  $R_1$  от центра пятна нагрева и начинают перемещение источника энергии термоприемника над исследуемым изделием со скоростью  $V$ . Сигнал с термоприемника, пропорциональный избыточной температуре в контролируемой точке поверхности исследуемого объекта, усиливается усилителем 4 и поступает на первый вход вычитающего устройства 5, на второй вход которого подается с блока 6 напряжение, моделирующее значение заданной

температуры  $T_{1\text{зад}}$ . Разностный сигнал с выхода вычитающего устройства 5 через аналого-цифровой преобразователь 7 поступает в микропроцессорное устройство 8. В зависимости от величины разностного сигнала в микропроцессоре вычисляется значение кода, который подается на управляемый делитель частоты 9 и определяет коэффициент деления опорной частоты, подаваемой с генератора тактовых импульсов 10. Результирующая частота подается на блок управления 11 оптическим затвором 12. Последний осуществляет частотно-импульсную модуляцию луча лазера 2. Изменение частоты подачи тепловых импульсов от источника тепла (лазера) осуществляется до тех пор, пока контролируемая избыточная температура поверхности исследуемого объекта станет равной заданному значению  $T_{1\text{зад}}$ , т.е.  $T(R_1) = T_{1\text{зад}}$ . При этом разностный сигнал на выходе вычитающего устройства 5 отсутствует, а в оперативной памяти микропроцессора 8 фиксируется частота подачи тепловых импульсов от источника  $F_{x1}$ , значение которого может быть вызвано оператором на индикаторное устройство 13. Затем по команде с микропроцессора 8 блок механического изменения расстояния между источником и термоприемником 14 переносит термоприемник на расстояние  $R_2$  от пятна нагрева источника тепла. Далее аналогично вышеописанным процедурам осуществляется изменение частоты подачи тепловых импульсов от источника тепла до тех пор, пока контролируемая избыточная температура на расстоянии  $R_2$  станет равной заданному значению  $T_1$ , т.е.  $T(R_2) = T_{1\text{зад}}$ .

При этом в оперативной памяти микропроцессора фиксируется найденная частота тепловых импульсов  $F_{x2}$ . Величина избыточной температуры  $T_{1\text{зад}}$  задается в диапазоне 30...50 % от температуры термодеструкции исследуемого материала. Искомые ТФХ определяются по формулам:

$$a = \frac{VR_1}{2 \ln 3 \frac{F_{x1}}{F_{x2}}}, \quad (1)$$

$$\lambda = \frac{F_{x1}q_0}{2\pi T(R_1)R_1} \exp\left(-\frac{V(R_1-x)}{2a}\right), \quad (2)$$

Проведем анализ погрешностей результатов измерений тепло- и температуропроводности  $a$  и  $\lambda$  на аналитической основе используя подход, изложенный в работе [2]. В соответствии с уравнением (1) полная погрешность  $\Delta a_j^*$  зависит от точности установления  $V$ ,  $R_1$ , а также от точности измерений  $F_{x1}$  и  $F_{x2}$ . Следовательно, полная погрешность (без учета погрешности округления) результатов измерения  $a$  будет определяться выражением:

$$\Delta a_j^* = a_j^* - a_j = \Delta_V a_j^* + \Delta_{R_1} a_j^* + \Delta_{F_{x1}} a_j^* + \Delta_{F_{x2}} a_j^*,$$

где  $\Delta_V a_j^* = \frac{\Delta V R_1}{2 \ln \left[ 3 \frac{F_{x1j}}{F_{x2j}} \right]}$  – погрешность, обусловленная отличием  $V$  от истинного значения  $V_{ин}$ , т.е.  $V = V_{ин} +$

$\Delta V$ ;  $\Delta_{R_1} a_j^* = \frac{V \Delta R}{2 \ln \left[ 3 \frac{F_{x1j}}{F_{x2j}} \right]}$  – погрешность, обусловленная отличием  $R_1$  от  $R_{1ин}$  ( $R_1 = R_{1ин} + \Delta R_1$ );

$\Delta_{F_{x1}} a_j^* = \frac{V \cdot R_1}{2} \cdot \left[ \frac{1}{\ln \left[ 3 \frac{F_{x1uj} + \Delta F_{x1j}^*}{F_{x2j}} \right]} - \frac{1}{\ln \left[ \frac{F_{x1uj}}{F_{x2j}} \right]} \right]$  – погрешность, обусловленная отличием  $F_{x1}$  от  $F_{x1ин}$  ( $F_{x1} = F_{x1ин} + \Delta F_{x1}$ );

$\Delta_{F_{x2}} a_j^* = \frac{VR_1}{2} \left[ \frac{1}{\ln \left[ 3 \frac{F_{x1j}^*}{F_{x2uj} + \Delta F_{x2j}^*} \right]} - \frac{1}{\ln \left[ \frac{F_{x1j}^*}{F_{x2uj}} \right]} \right]$  – погрешность, обусловленная отличием  $F_{x2}$  от  $F_{x2ин}$  ( $F_{x2} = F_{x2ин} + \Delta F_{x2}$ ).

Рассмотрим далее уравнение (2). Его структура показывает, что полная погрешность  $\Delta \lambda_j^*$  зависит от точности установления  $q_0$ ,  $R_j$ ,  $V$ , а также от точности измерений  $T_1^*(R_1)$ ,  $F_{x1}^*$ ,  $x^*$ ,  $a^*$ . Следовательно,

$$\Delta \lambda_j^* = \Delta_{q_0} \lambda_j^* + \Delta_{F_{x1}} \lambda_j^* + \Delta_V \lambda_j^* + \Delta_{R_1} \lambda_j^* + \Delta_x \lambda_j^* + \Delta_{T(R_1)} \lambda_j^* + \Delta_a \lambda_j^*,$$

где  $\Delta_{q_0} \lambda_j^* = \Delta q_0 \frac{F_{x1j}}{2\pi T_j(R_1)R_1} \exp\left(-\frac{V(R_1-x)}{2a_j}\right)$  – погрешность из-за отличия  $q_0$  от  $q_{0ин}$  ( $q_0 = q_{0ин} + \Delta q_0$ );

$\Delta_{F_{x1}} \lambda_j^* = \Delta F_{x1j}^* \frac{q_0}{2\pi T_j(R_1)R_1} \exp\left(-\frac{V(R_1-x)}{2a_j}\right)$  – погрешность, обусловленная отличием  $F_{x1}$  от истинного значения  $F_{x1ин}$ ;

$\Delta_V \lambda_j^* = \frac{F_{xj}^* q_0}{2\pi T_j(R_1)R_1} \left[ \exp\left(-\frac{(V_{ин} + \Delta V_j^*)(R_1-x)}{2a_j}\right) - \exp\left(-\frac{V_{ин}(R_1-x)}{2a_j}\right) \right]$  – погрешность, обусловленная отличием

$V$  от истинного значения  $V_{ин}$ .

Аналогично определяются погрешности, обусловленные отличием  $x$  от  $x_{ин}$ ,  $a$  от  $a_{ин}$ ,  $T(R_1)$  от  $T_{ин}(R_1)$ .

Полученные соотношения для определения составляющих полной погрешности позволяют выделить доминанты и определить характеристики этих погрешностей. В табл. 1 представлены результаты выделения доминант.

Таблица 1

Параметр		$R_1$	$x$	$F_{x1}$	$F_{x2}$	$T(R_1)$	$a$	$q_0$	$V$
Максимальное	$\delta a$	12	–	16	54	–	–	–	12
отклонение, %	$\delta \lambda$	38	49	11,4	–	15,6	23	11,4	56

Примечание: отклонение каждого параметра задавалось  $\pm 10\%$  при постоянстве остальных.

Анализ полученных результатов (табл. 1) показывает, что из четырех компонент  $a$  доминирует  $F_{x1}$ , а далее  $F_{x2}$ ,  $R_1$  и  $V$ . Для  $\lambda$  доминируют  $V$ ,  $x$  и  $R_1$ , далее по степени значимости следуют  $a$ ,  $T(R_1)$ ,  $F_{x1}$  и  $q_0$ .

Полученная информация о доминирующих компонентах и их вкладе в общую погрешность позволяет целенаправленно влиять на источники погрешностей, что в итоге будет способствовать повышению метрологического уровня представленного в работе метода неразрушающего контроля ТФХ материалов и готовых изделий.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1 Патент РФ № 200117813. Способ бесконтактного контроля ТФС материалов и устройство для его осуществления / А.В. Чернышов, Э.В. Сысоев. Заявл. 26.06.2001; Оpubл. 11.03.2003.

2 Чернышова Т.И., Чернышов В.Н. Методы и средства неразрушающего контроля теплофизических свойств материалов. М.: Машиностроение, 2001. 241 с.

*Кафедра «Криминалистика и информатизация правовой деятельности»*