

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Thern S. Blitzortung – Ein neuer Service in Deutschland // *EMV Journal*. – 1993. – V. 4. – № 3. – S. 206–208.
2. Anderson R.B., Eriksson A.J. Lightning parameters for engineering application // *Electra*. – 1980. – № 69. – P. 65–102.
3. Popolansky F. Correlation between the number of lightning flashes registred by lightning flash counters, the numbers of thunderstorm days and the duration of thunderstorms. SIGRE Report SC 33-71 (WG 011TF 01) 08/CS-IWD, May 1971.
4. Колоколов В.П. О характеристиках глобального распределения грозовой деятельности // *Метеорология и гидрология*. – 1969. – № 11. – С. 47–56.
5. Горбатенко В.П., Дульзон А.А. Влияние изменения подстилающей поверхности на грозовую активность // *География и природные ресурсы*. – 1997. – № 2. – С. 142–146.
6. Горбатенко В.П., Дульзон А.А., Решетько М.В. Пространственные и временные вариации грозовой активности над Томской областью // *Метеорология и гидрология*. – 1999. – № 12. – С. 21–28.
7. Горбатенко В.П. О зависимости плотности разрядов молнии в землю от интенсивности грозовой деятельности // *Электричество*. – 2001. – № 7. – С. 16–21.
8. Global Hydrology and Climate Center. – <http://thunder.msfc.nasa.gov/data>
9. <http://flash.ess.washington.edu>

УДК 621.284.3

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК МАТЕРИАЛОВ МЕТОДОМ ИК ТЕРМОГРАФИИ

В.П. Вавилов, В.Г. Торгунаков, Д.А. Нестерук, С. Маринетти*, П. Бизон*, Э. Гринцато*

ФГНУ «НИИ интроскопии», г. Томск

E-mail: vavilov@introscopy.tpu.ru

*ITC-CNR, Padua, Italy

E-mail: sergio.marinetti@itc.cnr.it

Рассмотрено применение ИК-термографии для экспрессного определения теплофизических свойств материалов. Описан классический метод Паркера на примере обмазки вращающихся обжиговых печей, а также новый метод определения компонент тензора температуропроводности на примере углепластикового композита.

1. Введение

ИК термографию (тепловидение) можно рассматривать в качестве метода бесконтактной многоточечной термометрии, который не вносит принципиально новых моментов в известные способы определения теплофизических характеристик (ТФХ) материалов [1]. Такое преимущество тепловидения как высокая оперативность съема информации позволяет решать ряд задач, которые чисто технически не решаются в рамках методов, используемых в теплофизике и теплотехнике. Прежде всего, это относится к анализу пространственного распределения ТФХ, в частности, температуропроводности [2]. Например, применение аппарата преобразования Фурье позволяет определять компоненты тензора температуропроводности, то есть исследовать анизотропию материала.

В настоящей работе рассмотрены примеры использования тепловидения для оценки ТФХ материалов как в рамках классического метода Паркера, так и относительно нового способа оценки анизотропных свойств композитов с помощью преобразования Фурье. Экспериментальные исследования выполнены на обмазке вращающихся обжиговых печей и углепластиковом композите, причем для испытаний столь разнородных материалов использована одна и та же экспериментальная установка на базе тепловизора Thermovision-570 (FLIR Systems, США).

2. Стандартные методы определения теплофизических характеристик

Проблема измерения ТФХ с погрешностью на уровне 3...6 % решена в России на базе стандартных методов, использующих регулярный (квазистационарный) режим нагрева плоско-параллельных образцов материалов. Еще в СССР существовал ряд научных школ (г. Минск, Новосибирск, Москва, Ленинград, Тамбов) в данной области. В настоящее время, например, фирмой «ЛМТ» (г. С.-Петербург) выпускаются приборы для измерения теплопроводности и теплоемкости материалов. Основным требованием стандартных методов измерения ТФХ является тщательная подготовка образцов в плане выбора их размеров и подготовки поверхности. Процесс измерений с использованием регулярного режима обычно является более длительным, чем по методу Паркера; кроме того, с трудом поддаются исследованию высоко-котеплопроводные материалы или тонкие пленки.

3. Определение теплофизических характеристик по методу Паркера

В классической работе У. Паркера и др., опубликованной в 1961 г., предложен импульсный способ определения ТФХ [1]. В качестве базового выражения использовано решение задачи нагрева адиабатической пластины импульсом Дирака для поверхности, противоположной нагреву:

$$\frac{T^R}{(Wa/\lambda L)} = \theta_D^R = 1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n e^{-n^2 \pi^2 Fo}, \quad (1)$$

где T^R – избыточная температура задней поверхности, °C; θ_D^R – безразмерная температура; W – плотность поглощенной энергии, Дж/м²; a – температуропроводность, м²/с; λ – теплопроводность, Вт/(м·К); L – толщина пластины, м; $Fo = a\tau/L^2$ – число Фурье; τ – время, с. График изменения θ_D^R во времени изображен на рис. 1. Видно, что избыточная температура T^R (1) задней поверхности пластины изменяется от нуля до стационарного значения, определяемого выражением:

$$T_{st} = Wa / \lambda L. \quad (2)$$

При наличии теплоотдачи на поверхностях образца (коэффициент теплообмена $a \neq 0$), температура задней поверхности достигает максимума, а затем медленно спадает, охлаждаясь до начальной температуры.

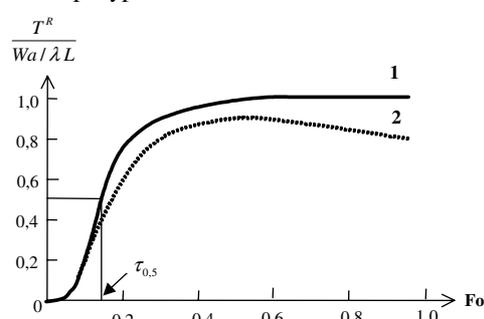


Рис. 1. Температура задней поверхности пластины, нагреваемой импульсом Дирака: (1 – адиабатический случай; 2 – неадиабатический)

Согласно методу Паркера на нарастающем фронте данной зависимости идентифицируют характерные точки, каждой из которых соответствует некоторое время τ^* , например, время «половинного» сигнала $\tau_{0,5}$.

Для любого экспериментально определенного момента времени τ^* величину температуропроводности находят из очевидного выражения:

$$a = Fo * \frac{L^2}{\tau^*}, \quad (3)$$

где для $\tau_{0,5}$ коэффициент $Fo^* = 0,1388$.

Метод Паркера в его различных воплощениях доминирует в мировых исследованиях по температуропроводности, в особенности, при анализе высокотеплопроводных материалов и тонких пленок. Модификация метода включают учет теплоотдачи на поверхностях изделия, конечных размеров образцов и конечной длительности реальных импульсов нагрева.

Помимо температуропроводности, метод Паркера позволяет определить коэффициент теплопроводности λ по выражению (2), если измерена плотность поглощенной энергии W . По известным a и λ теплоемкость находят как:

$$C = \lambda / (\rho \cdot a), \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К}). \quad (4)$$

4. Определение теплофизических характеристик обмазки обжиговых печей по методу Паркера

На протяжении ряда лет в ФГНУ «НИИ интроскопии» ведутся работы по внедрению метода и аппаратуры теплового контроля состояния вращающихся обжиговых печей, используемых, например, в производстве цемента [3]. Описанный выше метод Паркера был применен для определения ТФХ обмазки, образующейся на внутренней поверхности печей в процессе эксплуатации. Знание свойств обмазки необходимо для моделирования тепловых процессов, протекающих в печи и разработки алгоритмов управляющих воздействий на печь. Опубликованные данные по физическим свойствам обмазки фрагментарны и обладают большим разбросом, поэтому была поставлена задача определения ТФХ обмазки тех печей, где устанавливалась разработанная аппаратура.

Одной из основных трудностей в реализации метода Паркера является необходимость изготовления образцов с плоско-параллельными поверхностями (погрешности, связанные с невыполнением данного требования, обсуждены ниже). Был изготовлен ряд образцов обмазки толщиной от 10 до 20 мм. Описанный ниже эксперимент выполнен на образце толщиной $10 \pm 0,09$ мм.

Образец нагревали с помощью галогенной лампы КГ-220/1000, температуру измеряли на задней поверхности с помощью тепловизора Thermovision-570 (диапазон длин волн 7...13 мкм, температурное разрешение 0,1 °C, формат кадра 320×240, частота кадров 25 Гц). Записывали до 50 термограмм с интервалом 3 с. Обработку изображений проводили с использованием программы ThermoFit Pro [4], включая первичную фильтрацию данных по пространству и во времени, вычисление времени и определение температуропроводности по формуле (3).

Примеры термограмм в процессе нагрева образца показаны на рис. 2, изменение температуры задней поверхности во времени (хронологическая термограмма) – на рис. 3.

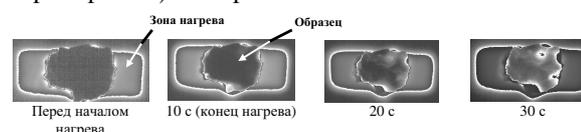


Рис. 2. Термограммы задней поверхности образца обмазки толщиной 10 мм (длительность нагрева 10 с)

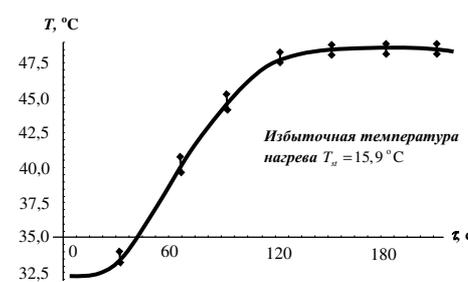


Рис. 3. Хронологическая термограмма образца обмазки, усредненная в зоне размером 10×10 мм (длительность нагрева 10 с, N – номер термограммы)

Карта температуропроводности, рассчитанная по характерному времени теплопередачи, представлена на рис. 4. Значение температуропроводности, усредненное по центральной части образца размером 10×10 мм, составило $a = (2,7 \pm 0,2) \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$.

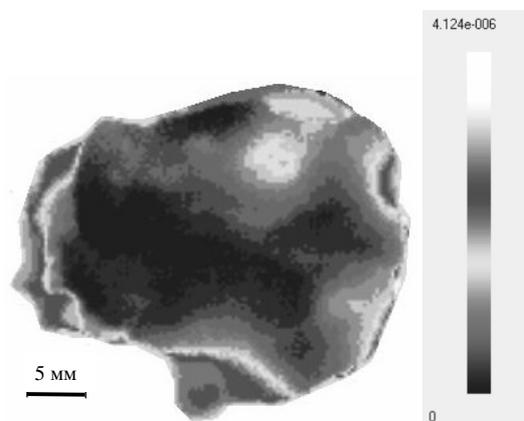


Рис. 4. Карта температуропроводности образца обматки

Для определения теплопроводности и теплоемкости обматки использованы формулы (2) и (4), причем в качестве T_{sp} принята максимальная избыточная температура образца, равная $15,9^\circ\text{C}$. Поглощенная образцом плотность мощности определена на лабораторном стандартном образце из стали 45, зачерненном сажей, и составила $Q = 21115 \text{ Вт}/\text{м}^2$. Тогда коэффициент теплопроводности обматки равен $\lambda = 0,36 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ и соответственно теплоемкость $C = 833 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$ при экспериментально измеренной плотности обматки $\rho = 1600 \text{ кг}/\text{м}^3$.

Рассмотрим погрешность определения ТФХ обматки по методу Паркера на примере измерения температуропроводности. В первом приближении будем считать, что определение теплопроводности проводится с той же погрешностью.

Из выражения (3) следует, что на оценку температуропроводности принципиально влияют погрешности определения характерного времени теплопередачи T_{sp} , а также толщины образца L .

Кроме того, в реальном эксперименте на оценку a влияет конечная длительность импульса нагрева ($\tau_h = 10 \text{ с}$) и интенсивность теплоотдачи на поверхностях α .

Полагая, что все вышеуказанные параметры независимы друг от друга, будем считать, что общая погрешность определения температуропроводности складывается из 4-х компонент:

$$\frac{\Delta a}{a} = \sqrt{\left(\frac{\Delta \tau_{0,5}}{\tau_{0,5}}\right)^2 + \left(2 \frac{\Delta L}{L}\right)^2 + \left(\frac{\Delta \alpha}{\alpha}\right)_{\alpha}^2 + \left(\frac{\Delta \alpha}{\alpha}\right)_{\tau_h}^2} \quad (5)$$

Погрешность определения характерного времени теплопередачи $\Delta \tau_{0,5}/\tau_{0,5}$ связана с крутизной функции T^k на том участке, где измеряют $\tau_{0,5}$ и погрешностью измерения температуры тепловизором ($0,1^\circ\text{C}$). Графически определено, что $\Delta \tau_{0,5} = 0,9 \text{ с}$ при измеренном среднем значении $\tau_{0,5} = 51,5 \text{ с}$. Таким образом, $\Delta \tau_{0,5}/\tau_{0,5} = 0,018$.

Погрешность прямого измерения толщины образца с помощью штангенциркуля определена на уровне $0,9 \text{ мм}$ при среднем значении 10 мм . Таким образом, $\Delta L/L = 0,09$.

Влияние длительности нагрева и интенсивности поверхностной теплоотдачи на оценку $\tau_{0,5}$ можно определить, анализируя известные аналитические решения, которые достаточно громоздки, поскольку требуют нахождения корней трансцендентных уравнений. В настоящем исследовании мы использовали программу ThermoCalc-2D, позволяющую рассчитывать двумерные тепловые поля в многослойном диске с внутренним дефектом численным методом (данная программа в течение многих лет используется мировыми экспертами в области теплового неразрушающего контроля и обеспечивает погрешность не хуже $0,5 \%$ для бездефектных зон и не хуже 3% для зон с дефектами) [4].

Решали задачу нагрева диска диаметром 100 мм и толщиной 10 мм , выполненного из обматки с найденными выше ТФХ. Длительность нагрева изменяли от 5 до 15 с при шаге 1 с . Интенсивность теплоотдачи изменяли от 5 до $15 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$, что соответствует типичным условиям лабораторного эксперимента.

Некоторые результаты расчетов приведены в таблице, где проиллюстрировано влияние теплоотдачи на передней поверхности, теплоотдачи на задней поверхности и длительности нагрева на расчетное значение $\tau_{0,5}$.

Таблица. Значения $\tau_{0,5}$ при нагреве неадиабатической пластины импульсами конечной длительности (обматка толщиной 10 мм)

$\tau_h, \text{ с}$	$\alpha, \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$		$\tau_{0,5}, \text{ с}$
	Передняя поверхность	Задняя поверхность	
10	10	10	50,6
10	0	10	51,5
10	10	0	51,5
10	7	15	48,9
5	10	10	47,1
15	10	10	52,0

Наибольшее влияние на $\tau_{0,5}$, а следовательно, и на оценку температуропроводности оказывает длительность нагрева. В теории метода Паркера на этот счет имеется следующая рекомендация: определенное из эксперимента значение $\tau_{0,5}$ должно быть уменьшено на величину, равную половине длительности импульса нагрева, т.е. за значение $\tau_{1/2}$ следует принимать величину $\tau_{0,5} - \tau_h/2$. С учетом этой рекомендации, используя данные таблицы, установлено, что определенные выше значения a и λ для обматки должны быть увеличены в $1,11$ раз, т.е. составлять: $a = 2,97 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$; $\lambda = 0,40 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$.

Погрешность оценки температуропроводности за счет неопределенности коэффициента теплоотдачи на обеих поверхностях образца и неточного определения длительности импульса нагрева, с учетом данных таблицы, найден следующим образом: $\Delta a/a_{\alpha} = 0,033$; $\Delta a/a_{\tau_h} = 0,020$.

Общая погрешность определения температуропроводности и теплопроводности по методу Паркера (5) составляет $\sqrt{2 \cdot 0,018^2 + 0,09^2 + 0,033^2 + 0,020^2} = 0,134$, или 13,4 %.

Окончательно, для обмазки: $a = (2,97 \pm 0,4) \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$; $\lambda = (0,40 \pm 0,05) \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$.

5. Определение температуропроводности ортотропных композитов

Преимущества тепловидения перед другими способами измерения температуры при определении ТФХ становятся особенно ощутимыми, когда в одном эксперименте необходимо оценить ТФХ вдоль основных координатных осей.

Ниже описаны предварительные результаты определения анизотропной температуропроводности углепластикового композита (тип 5 ply, 45°), являющегося важным конструкционным материалом в авиакосмической технике.

Способ тепловизионного анализа анизотропных материалов разработан относительно недавно [2, 5, 6]. Настоящее исследование является результатом сотрудничества специалистов ФГНУ «НИИ ИН» и Института технологии конструкций (Istituto delle Tecnologie di Costruzione, CNR), г. Падуя, Италия.

Постановка задачи нагрева полубесконечного ортотропного тела импульсом Дирака $\delta(\tau)$ с энергией W и пространственным распределением $f(x, y)$ в классической форме имеет вид:

$$\lambda_x \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \lambda_y \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \lambda_z \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = \rho C \frac{\partial T}{\partial \tau};$$

$$-\lambda_z \frac{\partial T(z=0)}{\partial z} = W \delta(\tau) f(x, y) - \alpha T(x, y, z=0);$$

$$\iint_{surf} f(x, y) dx dy = 1. \quad (6)$$

Применяя преобразование Лапласа ко времени и преобразование Фурье к пространственным координатам x и y , постановка задачи (6) преобразуется к виду:

$$\frac{\partial^2 \bar{T}}{\partial z^2} + \left(\frac{\lambda_x}{\lambda_z} \omega_x^2 + \frac{\lambda_y}{\lambda_z} \omega_y^2 + \frac{p}{a_z} \right) \bar{T} = 0, \quad \text{или}$$

$$\frac{\partial^2 \bar{T}}{\partial z^2} + \sigma^2 \bar{T} = 0; \quad \text{где } \sigma = \sqrt{\frac{\lambda_x}{\lambda_z} \omega_x^2 + \frac{\lambda_y}{\lambda_z} \omega_y^2 + p/a_z};$$

$$-\lambda_z \frac{\partial \bar{T}(z=0)}{\partial z} = W \Phi(\omega_x, \omega_y) - \alpha \bar{T}(z=0), \quad (7)$$

где $\Phi(\omega_x, \omega_y)$ – образ Фурье-функции $f(x, y)$.

Задача (7) имеет решение:

$$\bar{T} = \frac{W \Phi}{\lambda_z \sigma + \alpha} e^{-\sigma z}.$$

Для перехода из области Лапласа в область реального времени τ используем соответствующие таблицы и сдвиговые свойства преобразования Лапласа, после чего получим окончательное решение в виде:

$$\bar{T}(\omega_x, \omega_y, \tau) = \frac{W \Phi(\omega_x, \omega_y)}{\lambda_z} \times$$

$$\times e^{-(a_x \omega_x^2 + a_y \omega_y^2) \tau} \left[\sqrt{\frac{a_z}{\pi \tau}} e^{-\frac{z^2}{4a_z \tau}} - \frac{\alpha a_z}{\lambda_z} e^{\frac{\alpha z}{\lambda_z}} e^{-(\frac{\alpha}{\lambda_z})^2 a_z \tau} \times \right.$$

$$\left. \times \operatorname{erf} \left(\frac{\alpha}{\lambda_z} \sqrt{a_z \tau} + \frac{z}{2\sqrt{a_z \tau}} \right) \right].$$

На поверхности:

$$\bar{T}(\omega_x, \omega_y, z=0, \tau) = \frac{W \Phi(\omega_x, \omega_y)}{\lambda_z} \times$$

$$\times e^{-(a_x \omega_x^2 + a_y \omega_y^2) \tau} \left[\sqrt{\frac{a_z}{\pi \tau}} - \frac{\alpha a_z}{\lambda_z} e^{\frac{\alpha}{\lambda_z} a_z \tau} \operatorname{erf} \left(\frac{\alpha}{\lambda_z} \sqrt{a_z \tau} \right) \right]. \quad (8)$$

Решение (8) можно существенно упростить, рассмотрев отношение «температур Фурье» к нулевому члену на частотах, отличных от нуля:

$$\frac{\bar{T}(\omega_x, \omega_y, z=0, \tau)}{\bar{T}(\omega_x=0, \omega_y=0, z=0, \tau)} =$$

$$= \frac{\Phi(\omega_x, \omega_y)}{\Phi(\omega_x=0, \omega_y=0)} e^{-(a_x \omega_x^2 + a_y \omega_y^2) \tau}. \quad (9)$$

Выражение (9) определяет процедуру идентификации компонент температуропроводности a_x и a_y , которая включает: 1) запись последовательности термограмм; 2) интегрирование температуры последовательно по координатам y и x ; 3) логарифмирование отношения (9) и аппроксимация полученной функции отрезками прямых линий, наклон которых для каждой пространственной частоты равен искомой компоненте температуропроводности. Истинные значения пространственных частот определяют в каждом конкретном эксперименте, исходя из истинной величины пикселя.

В экспериментальных исследованиях была использована более простая модификация вышеприведенного алгоритма, описанная для задней поверхности пластины Ж.-К. Крапе с соавторами [2]. Образец из углепластика нагревали галогенной лампой мощностью 1 кВт, обеспечивавшей в плоскости образца плотность мощности приблизительно 20 кВт/м², через шелевую маску (рис. 5, а) и регистрировали температуру на задней поверхности образца (рис. 5, б, в). Одномерная шелевая маска создавала основную пространственную циклическую частоту $\omega = 2\pi/\Delta$, где $\Delta = 10$ мм. Ширина секторов шелевой маски (5 мм) была выбрана в соответствии с рекомендациями работы [2] для обеспечения оптимальной чувствительности по температуропроводности. Эксперимент проводили дважды для различных ориентаций маски нагрева относительно образца. Значения температуропроводности по координатам X и Y определяли из графика функции, полученной логарифмированием формулы (9):

$$\ln \frac{\bar{T}(\omega_x, \omega_y, z=0, \tau)}{\bar{T}(\omega_x=0, \omega_y=0, z=0, \tau)} = \ln \frac{\Phi(\omega_x, \omega_y)}{\Phi(\omega_x=0, \omega_y=0)} - a\omega^2 \tau.$$

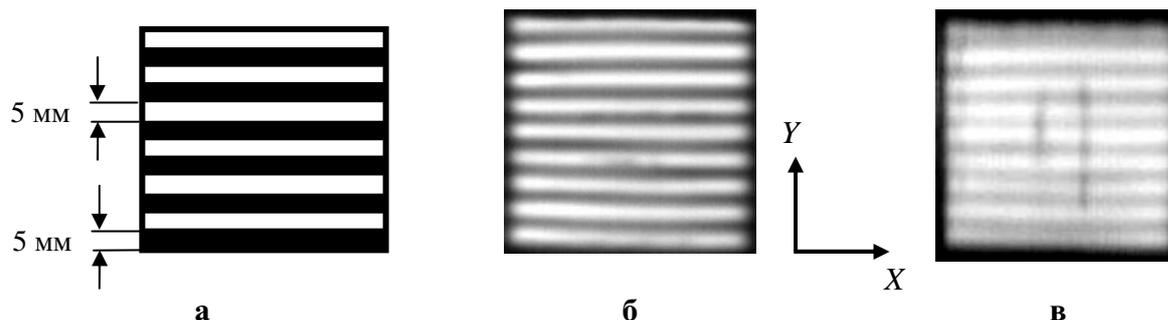


Рис. 5. Определение компонент тензора теплопроводности углепластика: а – целевая маска нагрева; б и в – термограммы при определении X и Y компонент (в центре – маркировка образца)

Экспериментальные графики данной функции для двух ориентаций маски показаны на рис. 6. Угловые коэффициенты графиков, определенные с помощью полиномиальной аппроксимации и построенные в координатах «логарифм отношения – номер изображения», равны $-0,0418$ и $-0,119$, соответственно для координат X и Y. Компоненты тензора теплопроводности, рассчитанные по формуле $a=k/\omega^2\Delta\tau$, где $\Delta\tau=0,235$ с – интервал записи, составили: $a_x=4,51\cdot 10^{-7}$ м²/с и $a_y=12,90\cdot 10^{-7}$ м²/с. Таким образом, теплопроводность в направлении координаты Y почти в 3 раза превышает таковую в направлении X.

7. Заключение

Описаны результаты исследования по определению теплофизических свойств теплоизолирующих материалов типа углепластика и обмазки печей для производства цемента, проводимых в ФГНУ «НИИ интроскопии». В основу использованной методики положен импульсный метод Паркера, позволяющий определять «сквозную» теплопроводность, а также относительно новый метод оценки «поперечных» компонент теплопроводности, основанный на применении преобразования Фурье к пространственным профилям температуры. Последний метод доказал свою эф-

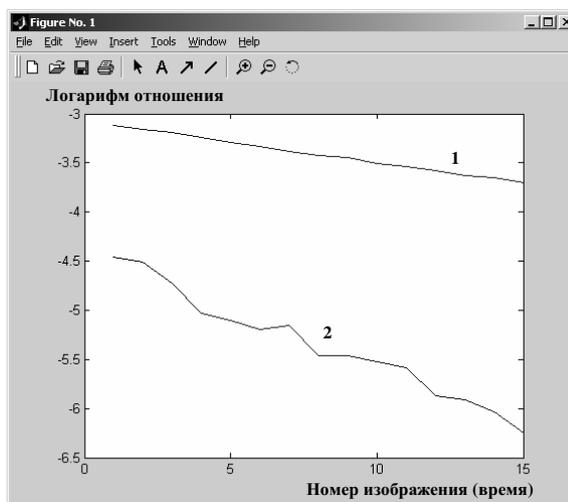


Рис. 6. Изменение

$$\ln[\tilde{T}(\omega_x, 0, z, \tau) / \tilde{T}(0, 0, z, \tau)] = \ln[\Phi(\omega_x, 0) / \Phi(0, 0)] - \alpha_x \omega_x^2 \tau$$

от времени при щелевом нагреве пластины из углепластика толщиной 1 мм (1 – по координате X, 2 – по координате Y)

фективность при анализе анизотропного углепластикового композита, для которого установлено, что «поперечные» компоненты теплопроводности различаются почти в три раза.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Parker W.J., Jenkins R.J., Butler C.P., Abbot G.L. Flash method of determining thermal diffusivity, heat capacity and thermal conductivity // J. Appl. Physics. – 1961. – V. 32. – № 9. – P. 1679–1684.
2. Krapez J.-C., Spagnolo L., Frieß M. Measurement of in-plane diffusivity in non-homogeneous slabs by applying flash thermography // Intern. J. of Thermal Sciences. – 2004. – V. 43. – P. 967–977.
3. Torgunakov V., Vavilov V. Inspecting rotating kilns used in cement production: line scanners and data processing // Thermosense XXV: Proc. SPIE. – 2003. – V. 5073. – P. 385–494.

4. Неразрушающий контроль / Под ред. В.В. Клюева. – М.: Машиностроение, 2004. – Т. 5. – 679 с.
5. Philippi I., Batsale J.-C., Mailet D., Degiovanni A. Measurements of thermal diffusivities through processing of infrared images // Rev. Sci. Instrum. – 1995. – V. 66(1). – P. 165–172.
6. Bison P.G., Grinzato E., Marinetti S. Local thermal diffusivity measurement // J. Quant. Infr. Thermography. – 2004. – V. 1. – № 2. – P. 241–250.