

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК  
МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
НАЦИОНАЛЬНЫЙ КОМИТЕТ ПО ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИМ СВОЙСТВАМ ВЕЩЕСТВ РАН  
ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУР РАН  
МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ им. Н.Э. БАУМАНА  
МОСКОВСКИЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ (ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)  
ГОУ ВПО «ТАМБОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

*Посвящается светлой памяти  
выдающегося ученого-теплофизика  
профессора А.А. Гухмана*

# **ТЕПЛОФИЗИКА В ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИИ И УПРАВЛЕНИИ КАЧЕСТВОМ**

**ШЕСТАЯ МЕЖДУНАРОДНАЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКАЯ ШКОЛА**

**1 – 6 октября 2007 года**

**Материалы школы**

**Часть I**



---

Тамбов  
◆Издательство ТГТУ◆  
2007

УДК 536.2.08.001.76

ББК ◀311

Т34

Редакционная коллегия:

С.В. Мищенко – *ответственный редактор*,  
С.В. Пономарев – *зам. ответственного редактора*,  
О.С. Дмитриев, П.С. Беляев, В.Н. Чернышов, А.Г. Дивин,  
В.М. Панорядов, В.М. Дмитриев, Д.М. Мордасов,  
Е.П. Постникова, Н.Н. Мочалин

Т34 Теплофизика в энергосбережении и управлении качеством : материалы Шестой международной теплофизической школы : в 2 ч. Тамбов, 1 – 6 окт. 2007 г. / ТГТУ. – Тамбов, 2007. – Ч. 1. – 264 с. – 400 экз. – ISBN 978-5-8265-0614-1.

В сборник включены материалы докладов по следующей тематике: фундаментальные и прикладные проблемы теплофизики, новые методы, приборы и установки для теплофизических исследований.

Предназначен для преподавателей, аспирантов и студентов с целью использования в научной работе и учебной деятельности.

УДК 536.2.08.001.76

ББК ◀311

**Спонсоры** школы: Российский фонд фундаментальных исследований (РФФИ), ГОУ ВПО «Тамбовский государственный технический университет».

Материалы, вошедшие в сборник, сохраняют авторскую редакцию.

ISBN 978-5-8265-0614-1

© ГОУ ВПО «Тамбовский государственный  
технический университет» (ТГТУ), 2007

## ИМИТАЦИОННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДА НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ СТРУКТУРНЫХ ПЕРЕХОДОВ В ПОЛИМЕРАХ

Разработанный ранее метод [1 – 3], входящий в группу методов термического анализа, позволяет определять неразрушающим способом теплофизические свойства (ТФС) твердых материалов и фиксировать температурные характеристики структурных переходов в полимерных материалах (ПМ) по изменениям тепловой активности с ростом температуры. Теоретическую основу метода составляют аналитические закономерности распространения одномерного плоского температурного поля от поверхностного круглого источника тепла постоянной мощности при локальной регуляризации тепловых потоков в твердых телах, которые могут быть отнесены к классу плоского полупространства.

Согласно измерительной схеме (рис. 1, а), на исследуемое изделие осуществляется тепловое воздействие постоянной мощности с помощью встроенного в подложку измерительного зонда (ИЗ) нагревателя, выполненного в виде тонкого диска радиусом  $R$ . Начальное температурное распределение контролируется одновременно несколькими термоэлектрическими преобразователями (ТП), расположенными в центре нагревателя и на расстояниях  $r_i$  от центра в плоскости контакта подложки ИЗ и исследуемого тела. Центральным ТП в ходе эксперимента фиксируется термограмма – зависимость избыточной температуры  $T$  от времени.

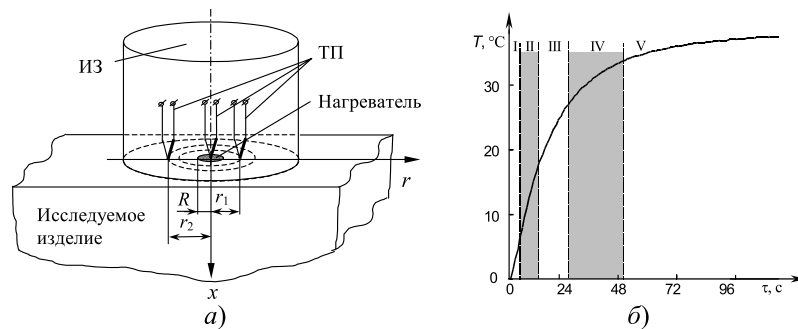


Рис. 1 Измерительная схема (а) и термограмма (б), зафиксированная в центре нагревателя на изделии из коксонаполненного фторопласта

Из рассмотрения характера изменения теплового потока, поступающего в изделие от действия нагревателя, на экспериментальной термограмме выделено пять участков (рис. 1, б). Участки II и IV – рабочие [1 – 3], характеризуются тем, что соответствующие им интервалы времени тепловой процесс проходит стадии регуляризации, т.е. тепловые потоки, поступающие в исследуемое тело и подложку зонда, сохраняются практически постоянными. На переходных участках I, III, V тепловые потоки изменяются во времени.

Известные решения краевых задач нестационарной теплопроводности, описывающие процесс распространения тепла в твердых телах с различными ТФС от плоского круглого нагревателя постоянной мощности, имеют весьма сложный вид и малопригодны для их использования при реализации неразрушающего метода. Однако известно, что распределение температуры от плоского круглого источника тепла постоянной мощности при малых значениях времени  $\tau$  близко к распределению температуры в плоском полупространстве [1, 2]. Поэтому для получения математической модели, описывающей процесс распространения тепла в исследуемой системе (изделие – зонд) на втором участке термограммы, зафиксированной центральным ТП, измерительная схема с плоским круглым нагревателем постоянной мощности заменена схемой с бесконечным плоским нагревателем. Это позволило получить расчетное соотношение, описывающее термограмму на втором (рабочем) участке [1, 2]:

$$T_1(0, \tau) = \frac{2q\sqrt{\tau}}{(\varepsilon_1 + \varepsilon_2)\sqrt{\pi}} - \frac{qc_n}{(\varepsilon_1 + \varepsilon_2)^2}, \quad (1)$$

где  $T_1$ ,  $\varepsilon_1$ ,  $\varepsilon_2$  – избыточная температура, тепловые активности материалов исследуемого изделия и подложки ИЗ, соответственно;  $q$  – удельная поверхностная мощность нагревателя;  $\tau$  – время;  $c_n$  – теплоемкость единицы площади нагревателя. Индексы 1, 2 отнесены к материалам исследуемого изделия и подложки ИЗ, соответственно.

Для четвертого (рабочего) участка термограммы расчетное соотношение приведено в работах [1 – 3].

Численным моделированием температурных полей методом конечных элементов с помощью пакета ELCUT [4] определена адекватность полученной математической модели (1) реальному тепловому процессу на втором (рабочем) участке термограммы [5].

В данной работе приводятся результаты имитационного исследования, в ходе которого по результатам ряда вычислительных экспериментов получено уравнение регрессии для определения температуры середины второго участка термограммы  $\bar{T}_p$  в зависимости от тепловой активности  $\varepsilon_1$  полимерного материала и удельной поверхностной мощности  $q$  нагревателя для ИЗ с подложкой из рипора (рис. 2). Уравнение имеет вид:

$$\bar{T}_p = 0,003q + 0,018\varepsilon_1 - 26,24. \quad (2)$$

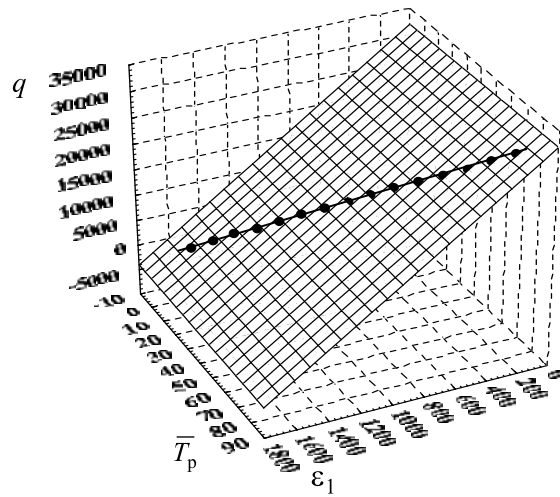


Рис. 2 Зависимость  $\bar{T}_p = f(q, \varepsilon_1)$

Диапазоны варьирования переменных:  $150 \leq \varepsilon_1 \leq 1550 \text{ Вт} \cdot \text{с}^{0,5}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ ;  $1000 \leq q \leq 29\,000 \text{ Вт}/\text{м}^2$ . Радиус нагревателя  $R = 4 \text{ мм}$ . Результаты регрессионного анализа представлены на рис. 2. Проверена значимость уравнения (2).

На рис. 3 и 4 представлены зависимости  $\bar{T}_p = f(\varepsilon_1)$ ,  $\bar{T}_p = f(R)$  и  $\bar{T}_p = f(q)$ , полученные численным моделированием. Условия моделирования:  $R = 4 \text{ мм}$ ;  $\varepsilon_1 = 758 \text{ Вт} \cdot \text{с}^{0,5}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ ; кривые 1–4 на рис. 3 соответствуют 1)  $q = 30250$ ; 2)  $q = 20500$ ; 3)  $q = 10750$ ; 4)  $q = 1000$ ; кривые 1–8 на рис. 4 соответствуют 1)  $R = 6,5$ ; 2)  $R = 5$ ; 3)  $R = 4,5$ ; 4)  $R = 4$ ; 5)  $R = 3,5$ ; 6)  $R = 3$ ; 7)  $R = 2,5$ ; 8)  $R = 2$ .

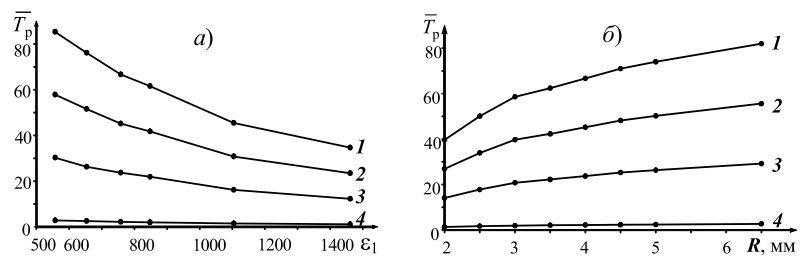


Рис. 3 Зависимости: а –  $\bar{T}_p = f(\varepsilon_1)$  и б –  $\bar{T}_p = f(R)$

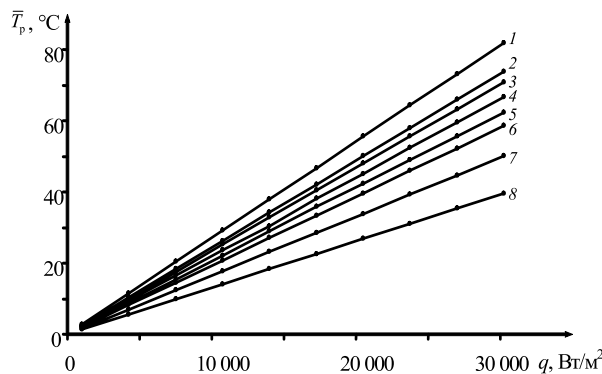


Рис. 4 Зависимости  $\bar{T}_p = f(q)$  при  $\varepsilon_1 = 758 \text{ Вт} \cdot \text{с}^{0,5}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$

и различных  $R$  (мм):

1 –  $R = 6,5$ ; 2 –  $R = 5$ ; 3 –  $R = 4,5$ ;  
4 –  $R = 4$ ; 5 –  $R = 3,5$ ; 6 –  $R = 3$ ; 7 –  $R = 2,5$ ; 8 –  $R = 2$

По уравнению регрессии (2) и полученным данным имитационного исследования, представленным на рис. 3 и 4, определяют диапазон температур второго участка термограммы, в котором возможна регистрация структурных переходов в ПМ по отклонениям зависимостей тепловой активности с ростом температуры.

#### Список литературы

- 1 Пат. 2167412 РФ, МПК G 01 N 25/18. Способ комплексного определения теплофизических свойств материалов / Н.П. Жуков, Н.Ф. Майникова, Ю.Л. Муромцев, И.В. Рогов. – № 99103718/28 ; заявл. 22.02.99 ; опубл. 20.05.2001, Бюл. № 14.
- 2 Об одном методе термического анализа для неразрушающего контроля теплофизических свойств полимеров / Н.Ф. Майникова, Ю.Л. Муромцев, И.В. Рогов, А.А. Балашов // Пластические массы. – 2001. – № 2. – С. 30 – 33.
- 3 Об одном методе исследования твердофазных переходов в полимерах / Н.Ф. Майникова, Ю.Л. Муромцев, Н.П. Жуков, А.А. Балашов // Пластические массы. – 2002. – № 6. – С. 23 – 26.
- 4 ELCUT: Моделирование двумерных полей методом конечных элементов. Версия 5.1. Руководство пользователя. – СПб. : Производственный кооператив ТОР, 2003. – 249 с.
- 5 Определение условий адекватности модели распределения тепла в плоском полупространстве реальному процессу при теплофизическом контроле / Н.П. Жуков, Н.Ф. Майникова, А.А. Балашов, С.С. Никулин // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2006. – Т. 12, № 3А. – С. 610 – 616.