

## ИМИТАЦИОННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОПЕРЕНОСА В МЕТОДЕ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ СТРУКТУРНЫХ ПЕРЕХОДОВ В ПОЛИМЕРАХ

Н.Ф. Майникова<sup>1</sup>, Н.П. Жуков<sup>2</sup>, А.А. Балашов<sup>2</sup>, Д.Г. Бородавкин<sup>2</sup>

*Кафедры: «Теория машин, механизмов и детали машин» (1),  
«Гидравлика и теплотехника» (2), ГОУ ВПО «ТГТУ»*

*Представлена членом редколлегии профессором В.И. Коноваловым*

**Ключевые слова и фразы:** неразрушающий контроль; плоское полупространство; структурный переход; теплофизические свойства; численное моделирование.

**Аннотация:** Проведено имитационное исследование метода неразрушающего контроля структурных переходов в полимерных материалах.

### Обозначения

$c$ – удельная теплоемкость, Дж/(кг·К);	$T$ – избыточная температура, °С;
$q$ – тепловой поток, Вт/м <sup>2</sup> ;	$\varepsilon$ – тепловая активность, Вт·с <sup>0.5</sup> /(м <sup>2</sup> ·К);
$R$ – радиус, м;	$\tau$ – время, с.
$r$ – расстояние, м;	

Разработанный авторами 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 данного метода неразрушающего контроля (**НК**) 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 [4–6]. Одномерное температурное поле было использовано в связи с тем, что двух- и трехмерность полей обычно не обеспечивает заметного улучшения эксплуатационных показателей метода и при этом, как правило, ухудшает его метрологические возможности.

Согласно измерительной схеме метода (рис. 1, *a*) тепловое воздействие на исследуемое полимерное тело, имеющее равномерное начальное температурное распределение, осуществляется с помощью нагревателя постоянной мощности, выполненного в виде тонкого диска радиусом  $R$ , встроенного в подложку измерительного зонда (**ИЗ**). Начальное температурное распределение контролируется одновременно несколькими (не менее трех) термоэлектрическими преобразователями (**ТП**), расположенными в центре нагревателя и на расстояниях  $r_i$  от центра в плоскости контакта подложки ИЗ и исследуемого тела. ТП в ходе эксперимента фиксируют термограммы – зависимости избыточной температуры  $T$  (или температуры исследуемого изделия  $T^*$ ) от времени.

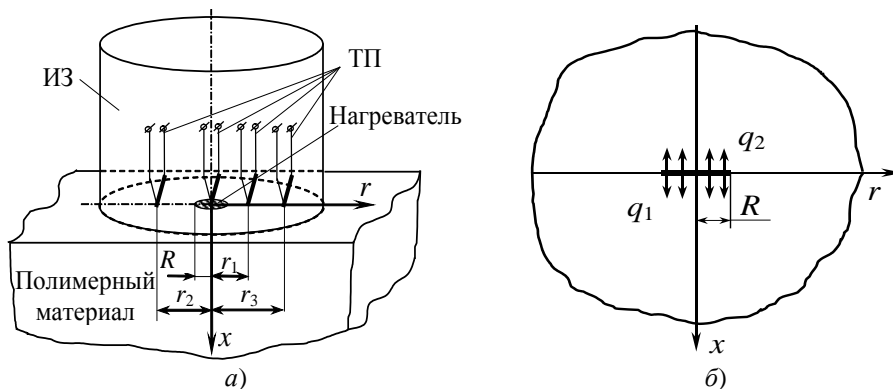


Рис. 1. Измерительная (а) и тепловая (б) схемы

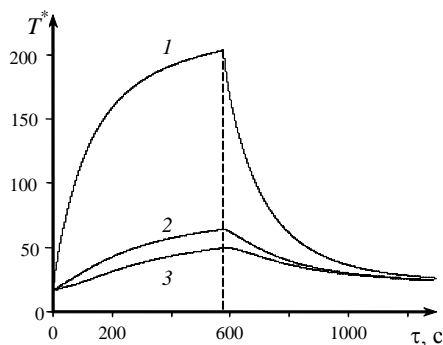
На рис. 2 представлены термограммы, полученные экспериментально на изделии из политетрафторэтилена (ПТФЭ) при следующих условиях: начальная температура  $T_n = 23\text{ }^\circ\text{C}$ ;  $T^*$  – температура изделия,  $T^* = T_n + T$ ; радиус нагревателя  $R = 4\text{ мм}$ ; мощность нагревателя  $W = 0,6\text{ Вт}$ ; временной интервал измерения температуры  $\Delta t = 0,25\text{ с}$ ; расстояния от центра нагревателя  $r_1 = 7\text{ мм}$  и  $r_2 = 9\text{ мм}$ . В общем случае на каждой из термограмм можно выделить несколько участков, соответствующих различным состояниям температурного поля исследуемой системы. Так, для термограммы, зафиксированной центральным ТП на изделии из ПМ вне области структурных переходов, характерны восемь участков (рис. 3).

Первому участку соответствует одномерное температурное поле в локальной области исследуемого тела (вблизи нагревателя). Тепловые потоки, поступающие в изделие  $q_1$  и зонд  $q_2$ , изменяются во времени, так как между нагревателем и исследуемым телом имеется термическое сопротивление, нагреватель обладает инерционностью. Второму участку отвечает одномерное температурное поле, но процесс проходит стадию регуляризации в локальной области исследуемого тела, расположенной вблизи нагревателя. Третьему участку соответствует двухмерное температурное поле в образце, поскольку нельзя пренебречь распространением тепла в радиальном направлении. Четвертому участку соответствует тепловой процесс, вышедший на стадию регуляризации. В локальной области исследуемого ПМ формируется температурное поле, близкое к одномерному полусферическому. На пятом участке нарушаются условия полуограниченности исследуемого тела.

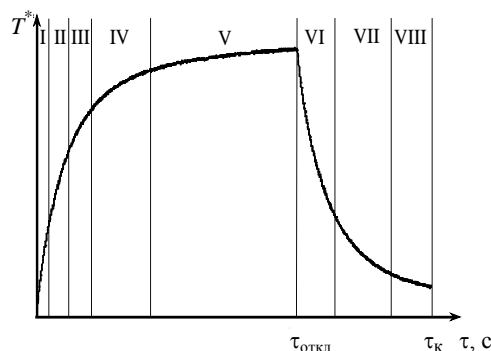
После отключения нагревателя ( $\tau > \tau_{\text{откл}}$ ), на стадии остывания, можно выделить шестой участок, когда тепловые потоки  $q_1$  и  $q_2$  изменяются во времени, седьмой участок термограммы, тепловой процесс в котором проходит стадию регуляризации, и восьмой участок, где тепловой процесс изменяется.

Участки термограммы II, IV и VII – рабочие [1–3], так как вне области структурного перехода в ПМ возможно однозначно определить значения ТФС в зависимости от параметров аналитических моделей, описывающих термограмму на данных температурно-временных интервалах, используя регулярные тепловые режимы на моделях плоского и сферического полупространств [4]. Авторами разработаны методики определения границ рабочих участков с использованием статистических критериев [1].

Известные решения краевых задач нестационарной теплопроводности, описывающие процесс распространения тепла в твердых телах с различными ТФС [4–6] от плоского круглого нагревателя постоянной мощности радиуса  $R$ , имеют



**Рис. 2. Термограммы для ПТФЭ:**  
1 – в центре зонда; 2, 3 – на расстояниях  
7 и 9 мм от центра



**Рис. 3. Термограмма I (рис. 2)  
с выделенными участками**

весьма сложный вид и малопригодны для их использования при реализации метода НК. Однако, учитывая, что распределение температуры от плоского круглого источника тепла постоянной мощности радиуса  $R$  при малых значениях времени  $\tau$  близко к распределению температуры в плоском полупространстве [1–4], для получения математической модели, описывающей процесс распространения тепла в исследуемой системе (изделие–зонд) на втором участке термограммы, измерительная схема с плоским круглым нагревателем постоянной мощности радиусом  $R$  заменена схемой с бесконечным плоским нагревателем [1–3]. Это позволило получить расчетное соотношение, описывающее термограмму на втором (рабочем) участке

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

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

Для четвертого и шестого (рабочих) участков термограммы расчетные соотношения приведены в работах [1–3].

Численным моделированием температурных полей методом конечных элементов с помощью пакета ELCUT [7], определена адекватность полученной математической модели (1) реальному тепловому процессу на втором (рабочем) участке термограммы [9].

В данной работе авторами представлены результаты ряда вычислительных экспериментов, по которым получено уравнение регрессии для определения температуры середины второго (рабочего) участка термограммы  $\bar{T}_p$  в зависимости от тепловой активности  $\varepsilon_1$  полимерного материала и удельной поверхностной мощности  $q$  для измерительного зонда с подложкой из рипора.

Данная зависимость имеет следующий вид

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

Диапазоны варьирования переменных:  $150 \leq \varepsilon_1 \leq 1550 \text{ Вт}\cdot\text{с}^{0,5}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$ ;  $1000 \leq q \leq 29000 \text{ Вт}/\text{м}^2$ . Радиус нагревателя  $R = 4\cdot 10^{-3} \text{ м}$ . Результаты регрессионного анализа представлены на рис. 4.

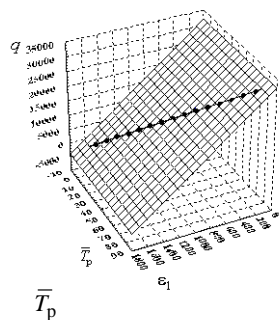


Рис. 4. Зависимость  $\bar{T}_p = f(q, \varepsilon_1)$

Для значения множественного коэффициента детерминации  $R_d^2 = 0,999$ , свидетельствующего о том, что вариация исследуемой переменной  $\bar{T}_p$  (температуры середины рабочего участка) на 99,9 % объясняется изменчивостью включенных в модель переменных, проверена значимость уравнения регрессии (2). Если  $F$  (фактическое значение критерия Фишера) превышает некоторое критическое значение выбранных данных  $n, k$  ( $n$  – размер выборки;  $k$  – число коэффициентов модели) и принятой доверительной вероятности, то величина  $R_d^2$  считается существенной

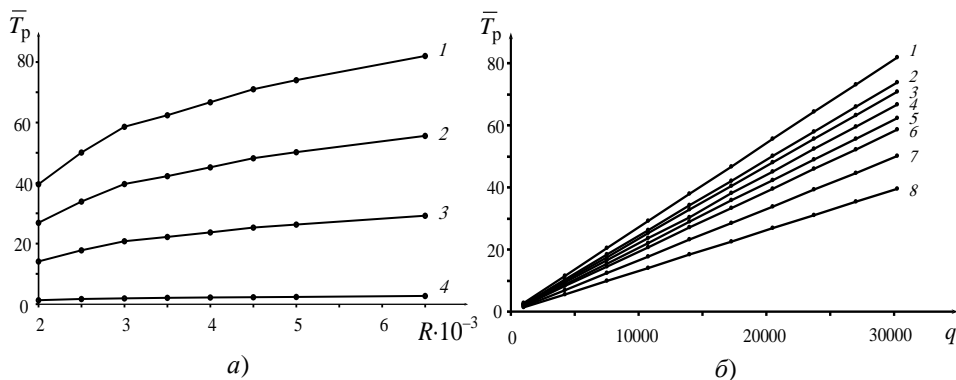
$$F = \frac{R_d^2}{1 - R_d^2} \frac{n - k}{k - 1} = \frac{0,999}{1 - 0,999} \frac{15 - 2}{2 - 1} = 12987.$$

Фактическое значение  $F$  больше табличного  $F_{0,05; 2; 12} = 3,89$ , определенного на уровне значимости  $\alpha = 0,05$  при  $k_1 = k = 2$  и  $k_2 = n - k - 1 = 15 - 2 - 1 = 12$  степенях свободы [8]. Таким образом, уравнение регрессии (2) значимо. Следовательно, исследуемая зависимая переменная  $\bar{T}_p$  достаточно хорошо описывается включенными в регрессионную модель переменными  $q$  и  $\varepsilon_1$ .

На рис. 5 а, б представлены зависимости  $\bar{T}_p = f(R)$ ,  $\bar{T}_p = f(q)$ , полученные численным моделированием.

По уравнению регрессии (2) и данным имитационного исследования, представленным на рис. 5, определяют температуру  $\bar{T}_p$  в области второго участка термограммы, в котором возможна регистрация структурных переходов в полимерных материалах по отклонениям зависимостей тепловой активности с ростом температуры.

Пример реализации метода неразрушающего контроля температурных характеристик структурных переходов в полимерах представлен на рис. 6. Используются термограммы, зафиксированные центральным ТП после калибровки ИЗ на материалах с известными ТФС [10]. Условия проведения опытов, выбранные с учетом выполненного имитационного исследования, следующие:  $R = 4$  мм;  $W = 0,7$  Вт;  $\Delta\tau = 0,5$  с;  $T_H = 21$  °С. Исследовали твердофазные переходы в политетрафторэтилене (см. рис. 6, а) и капролоне (см. рис. 6, б).

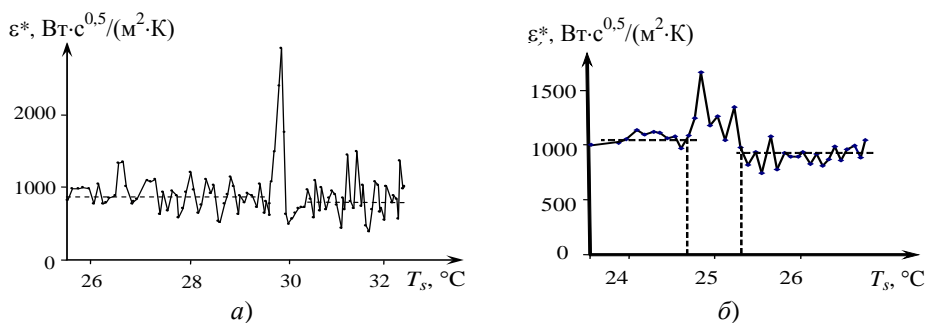


**Рис. 5. Зависимости  $\bar{T}_p = f(R)$  и  $\bar{T}_p = f(q)$ . Условия моделирования:**

*a*)  $\varepsilon_1 = 758,1$ ;  $q = 30250$  (1);  $q = 20500$  (2);  $q = 10750$  (3);  $q = 1000$  (4);

*б*)  $\varepsilon_1 = 758,1$ ;  $R = 6,5$  (1);  $R = 5$  (2);  $R = 4,5$  (3);  $R = 4$  (4);  $R = 3,5$  (5);

$R = 3$  (6);  $R = 2,5$  (7);  $R = 2$  (8)



**Рис. 6. Зависимость  $\varepsilon^* = f(T_s)$  для изделия из ПТФЭ (*a*) и капролона (*б*)**

Известно, что в ПТФЭ при температуре ниже  $19,6^\circ\text{C}$  элементарная ячейка ПТФЭ имеет триклиническую структуру. В интервале от  $19,6$  до  $30^\circ\text{C}$  существует гексагональная элементарная ячейка, выше  $30^\circ\text{C}$  стабильной становится псевдогексагональная решетка. Удельные теплоты переходов составляют соответственно:  $4,0 \pm 0,5$  и  $1,2 \pm 0,3$  кДж/кг. Твердофазный переход в ПТФЭ, происходящий при  $T_n = 30^\circ\text{C}$  и сопровождающийся эндотермическим эффектом, зарегистрирован при  $T_n = 29,8^\circ\text{C}$  (см. рис. 6, *a*). Твердофазный переход в капролоне, соответствующий переходу при  $25^\circ\text{C}$  гексагональной решетки в моноклинную, проявился в интервале температур  $24,7 \dots 25,3^\circ\text{C}$  (см. рис. 6, *б*).

Твердофазные переходы в политетрафторэтилене и капролоне проявились в температурных интервалах, соответствующих вторым участкам на термограммах.

Полученные результаты хорошо согласуются со справочными данными.

Таким образом, найденное уравнение регрессии и результаты имитационного исследования позволили обнаружить структурные переходы в ПТФЭ и капролоне по отклонениям на зависимостях тепловой активности от температуры.

#### Список литературы

1. Пат. 2167412 Российская Федерация, МПК G 01 N 25/18. Способ комплексного определения теплофизических свойств материалов / Н.П. Жуков, Н.Ф. Майникова, Ю.Л. Муромцев, И.В. Рогов; заявитель и патентообладатель Тамб. гос. техн. ун-т. – № 99103718/28; заявл. 22.02.99; опубл. 20.05.2001, Бюл. № 14. – 8 с.

2. Об одном методе термического анализа для неразрушающего контроля теплофизических свойств полимеров / Н.Ф. Майникова [и др.] // Пластические массы. – 2001. – № 2. – С.30–33.
3. Об одном методе исследования твердофазных переходов в полимерах / Н.Ф. Майникова [и др.] // Пластические массы. – 2002. – № 6. – С. 23–26.
4. Платунов, Е.С. Теплофизические измерения и приборы / Е.С. Платунов. – Л. : Машиностроение, 1986. – 256 с.
5. Лыков, А.В. Теория теплопроводности / А.В. Лыков. – М. : Высшая школа, 1967. – 599 с.
6. Козлов, В.П. Двумерные осесимметричные нестационарные задачи теплопроводности / В.П. Козлов. – Минск : Наука и техника, 1986. – 392 с.
7. ELCUT: Моделирование двумерных полей методом конечных элементов. Версия 5.1. Руководство пользователя. – СПб. : Производственный кооператив ТОР, 2003. – 249 с.
8. Химмельблау, Д. Анализ процессов статистическими методами / Д. Химмельблау – М. : Мир, 1973. – 960 с.
9. Определение условий адекватности модели распределения тепла в плоском полупространстве реальному процессу при теплофизическом контроле / Н.П. Жуков [и др.] // Вест. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2006. – Т. 12, № 3А. – С. 610–616.
10. Жуков, Н.П. Многомодельные методы и средства неразрушающего контроля теплофизических свойств материалов и изделий / Н.П. Жуков, Н.Ф. Майникова. – М. : Машиностроение-1, 2004. – 288 с.

---

### **Simulated Research into Heat Transfer in the Method of Nondestructive Control over Structural Transformations of Polymers**

N.F. Mainikova<sup>1</sup>, N.P. Zhukov<sup>2</sup>, A.A. Balashov<sup>2</sup>, D.G. Borodavkin<sup>2</sup>

*Departments: “Theory of Machines, Mechanisms and Machine Parts” (1),  
“Hydraulics and Heat Engineering” (2), TSTU*

**Key words and phrases:** flat semi-space; non-destructive control; numerical modeling; structural transformation; thermo-physical properties.

**Abstract:** Simulated research into the method of non-destructive control over structural transformations in polymer materials is carried out.

---

### **Imitationsforschung der Wärmeübertragung in der Methode der nicht zerstörenden Kontrolle der strukturellen Übergänge in den Polymeren**

**Zusammenfassung:** Es ist die Imitationsforschung der Methode der nicht zerstörenden Kontrolle der strukturellen Übergänge in den Polymerstoffen durchgeführt.

---

### **Etude d'imitation du transfert de la chaleur dans la méthodes du contrôle non-destructif des passages structuraux dans les polymères**

**Résumé:** Est réalisée une étude d'imitation du transfert de la chaleur dans la méthode du contrôle non-destructif des passages structuraux dans les polymères.