

УДК 519.22

**СПОСОБ ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАБОЧИХ УЧАСТКОВ
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ТЕРМОГРАММ**

А. А. Балашов, Д. С. Кацуба

ФГБОУ ВПО «Тамбовский государственный технический университет», г. Тамбов

Рецензент д-р техн. наук, доцент М. В. Соколов

Ключевые слова и фразы: коэффициенты математической модели; многомодельный метод; неразрушающий контроль; рабочий участок; термограмма.

Аннотация: Разработаны способы оценки коэффициентов математических моделей и нахождения рабочих участков экспериментальных термограмм с помощью статистического критерия Дарбина–Уотсона.

Постановка и решение тепловых задач значительно упрощаются, если использовать аналитическую теорию теплопроводности для областей с границами, перемещающимися по определенному закону. Термический анализ, основанный на рабочих участках термограммы, позволяет получить более простые и во многих случаях линейные по параметрам расчетные соотношения [1]. Целью данной работы является разработка способа определения рабочих участков термограмм.

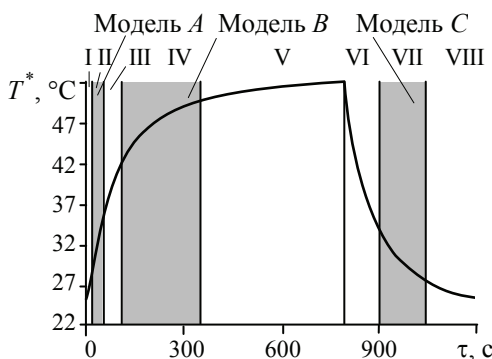


Рис. 1. Экспериментальная термограмма с выделенными рабочими участками для изделия из политетрафторэтилена

В основе многомодельных тепловых методов неразрушающего контроля (НК) теплофизических свойств (ТФС) полимерных материалов (ПМ) лежат следующие положения [1, 2].

1. На экспериментальных термограммах имеются рабочие участки, для которых обеспечивается требуемая точность совпадения с результатами численных вычислений по определенным математическим моделям (рис. 1). Данным рабочим участкам соот-

Балашов Алексей Александрович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Энергоэффективные системы», e-mail: balashovalexei@yandex.ru; Кацуба Дарья Сергеевна – аспирант, ассистент кафедры «Энергоэффективные системы», ТамбГТУ, г. Тамбов.

ветствуют тепловые режимы эксперимента, принадлежащие стадии локальной регуляризации тепловых потоков.

2. Для рабочих участков существуют простые выражения, позволяющие определить значения ТФС в зависимости от коэффициентов математической модели, описывающей экспериментальную термограмму на данном временном интервале, но вне области структурного перехода в ПМ. При структурном переходе в ПМ наблюдаются значительные отклонения ТФС.

Одна из важных операций, необходимых для реализации многомоделльных методов НК температурно-временных характеристик структурных переходов в ПМ, – определение рабочих участков на экспериментальной термограмме, другая – нахождение значений коэффициентов математических моделей A, B, C [3].

Экспериментальная термограмма разделяется на определенные участки, каждый из которых анализируется отдельно для выделения среди них рабочих. Участки экспериментальной термограммы II, IV и VII являются рабочими, так как на них можно определить значения ТФС исследуемого ПМ в зависимости от коэффициентов математической модели [4].

Термограмма на участке II, представленная на рис. 2 (а), описывается математической моделью A [3]

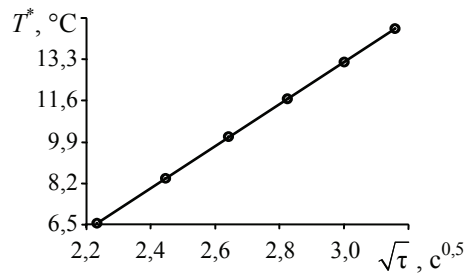
$$T_1(0, \tau) = \frac{2q\sqrt{\tau}}{(\varepsilon_1 + \varepsilon_2)\sqrt{\pi}} - \frac{qc_n}{(\varepsilon_1 + \varepsilon_2)^2}, \quad (1)$$

где T_1 – избыточная температура исследуемого изделия, °С; τ – время, с; q – тепловой поток, Вт/м²; $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ – коэффициенты тепловой активности материалов исследуемого изделия и подложки зонда соответственно, Вт·с^{0,5}/(м²·К); c_n – теплоемкость нагревателя на единицу площади, Дж/(м²·К).

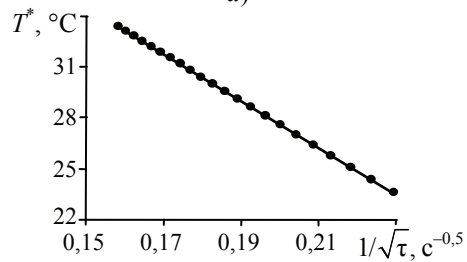
Как видно из выражения (1), на экспериментальной термограмме участку II будет отвечать прямолинейный отрезок в координатах $T^* = f(1/\sqrt{\tau})$, где $T^* = T_0 + T_1$, T_0 – начальная температура.

Термограмма для участка IV описывается математической моделью B [3]

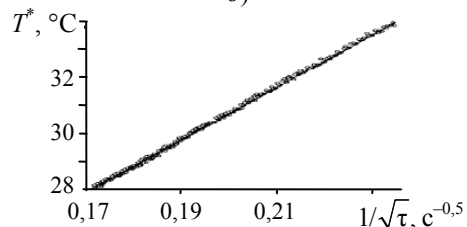
$$T_1(R, \tau) = \frac{2qR}{(\lambda_1 + \lambda_2)} \left(1 - \frac{R(\varepsilon_1 + \varepsilon_2)}{(\lambda_1 + \lambda_2)\sqrt{\pi}\sqrt{\tau}} \right), \quad (2)$$



а)



б)



в)

Рис. 2. Прямолинейный отрезок рабочих участков II (а), IV (б) и VII (в) термограммы

где λ_1, λ_2 – теплопроводности материалов исследуемого изделия и подложки зонда соответственно, Вт/(м·К); R – радиус поверхностного сферического нагревателя, м.

Как видно из выражения (2), на экспериментальной термограмме участку IV будет отвечать прямолинейный отрезок в координатах $T^* = f(1/\sqrt{\tau})$ (рис. 2, б).

Математическая модель С [3], описывающая участок VII термограммы, имеет вид

$$T_1(R, \tau) = \frac{(\varepsilon_1 + \varepsilon_2)qR^2}{(\lambda_1 + \lambda_2)^2 \sqrt{\pi}} \frac{1}{\sqrt{\tau}}. \quad (3)$$

Согласно выражению (3), на термограмме участку VII будет отвечать также прямолинейный отрезок в координатах $T^* = f(1/\sqrt{\tau})$ (рис. 2, в).

Так как выражения (1) – (3) являются линейными относительно переменных $z = \sqrt{\tau}$, $t = 1/\sqrt{\tau}$ и при вычислении используются единые участки экспериментальных термограмм, то для определения коэффициентов, входящих в выражения, наиболее эффективным является метод наименьших квадратов [1, 2].

Термограмма в общем виде состоит из m -го числа точек $T_j^* = f(\tau)$, где $j = 1, \dots, m$. Разделим термограмму на интервалы, содержащие по k точек, где k – целое нечетное число, $k > 3$. Присвоим каждому интервалу индекс i ($i = (k+1)/2, \dots, m - (k-1)/2$) и построим уравнения линейных зависимостей [4]:

$$T_i = d_{1i}z + d_{0i}; \quad (4)$$

$$T_i = b_{1i}t + b_{0i}; \quad (5)$$

$$T_i = h_i t, \quad (6)$$

где

$$d_{1i} = \frac{\sum_{j=i-\frac{k-1}{2}}^{i+\frac{k-1}{2}} T_j (z_j - \bar{z}_i)}{\sum_{j=i-\frac{k-1}{2}}^{i+\frac{k-1}{2}} (z_j - \bar{z}_i)^2}; \quad (7)$$

$$d_{0i} = T_s - d_{1i}\bar{z}_i, \quad \bar{z}_i = \frac{1}{k} \sum_{j=i-\frac{k-1}{2}}^{i+\frac{k-1}{2}} z_j, \quad T_s = \frac{1}{k} \sum_{j=i-\frac{k-1}{2}}^{i+\frac{k-1}{2}} T_j; \quad (8)$$

$$b_{1i} = \frac{\sum_{j=i-\frac{k-1}{2}}^{i+\frac{k-1}{2}} T_j (t_j - \bar{t}_i)}{\sum_{j=i-\frac{k-1}{2}}^{i+\frac{k-1}{2}} (t_j - \bar{t}_i)^2}; \quad (9)$$

$$b_{0i} = T_s - b_{1i} \bar{t}_i, \quad \bar{t}_i = \frac{1}{k} \sum_{j=i-\frac{k-1}{2}}^{i+\frac{k-1}{2}} t_j. \quad (10)$$

Коэффициент h_i выражения (6) находим аналогично коэффициенту b_{1i} по формуле (9).

Выражения (4) – (6) являются линейными, соответственно рабочим участкам на термограмме будут отвечать плоские вершины зависимостей $d_{1i} = f(T_s)$, $b_{1i} = f(T_s)$, $h_i = f(T_s)$, где T_s – средняя температура, измеренная по k точкам. Например, максимальному значению коэффициента d_{1i} будет отвечать одна из точек на вершине зависимости $d_{1i} = f(T_s)$.

Далее необходимо найти общее число точек рабочего участка и для этого воспользуемся статистическим критерием Дарбина–Уотсона, предполагающим вычисление статистики D для серии из k измерений [5]. Можно допустить, что не менее k точек принадлежат рабочему участку и, увеличивая вправо и влево этот участок, на основе выражений (7) – (10) определяем коэффициенты d_{1i} и b_{1i} . Вычисляем статистику D , и как только статистический критерий Дарбина–Уотсона имеет отрицательный результат, то заканчиваем процедуру увеличения рабочего участка [6].

При выделении рабочего участка экспериментальной термограм-

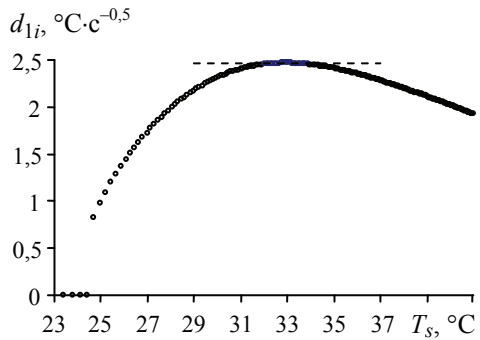


Рис. 3. Зависимость $d_{1i} = f(T_s)$ для рабочего участка II термограммы, зафиксированной на изделии из Ф4К20

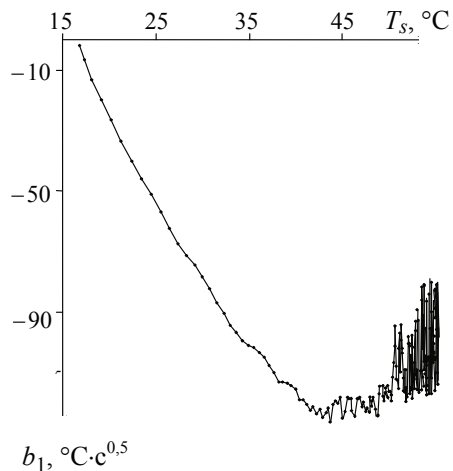


Рис. 4. Зависимость $b_{1i} = f(T_s)$ для рабочего участка IV термограммы, зафиксированной на изделии из ПТФЭ

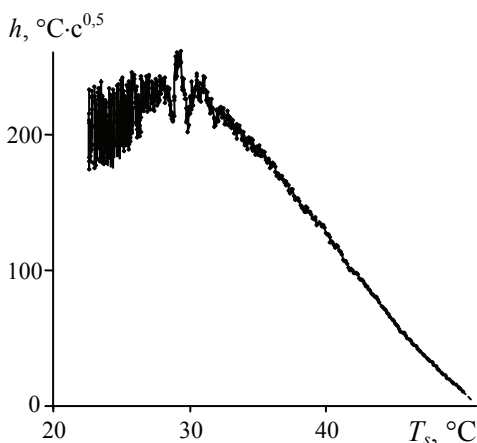


Рис. 5. Зависимость $h_i = f(T_s)$ для рабочего участка VII термограммы, зафиксированной на изделии из ПТФЭ

енный по термограмме, полученной при следующих конструктивных условиях: $R = 2,5 \cdot 10^{-3}$ м; исследуемое изделие – политетрафторэтилен (ПТФЭ). Условия испытания: $T_n = 16,7$ °С; $N = 1,9$ Вт; $\Delta\tau = 0,5$ с [4].

На рисунке 5 представлен график зависимости $h_i = f(T_s)$, построенный по термограмме, снятой при следующих конструктивных условиях: $R = 4 \cdot 10^{-3}$ м; исследуемое изделие – ПТФЭ. Условия испытания: $T_n = 22,1$ °С; $N = 0,7$ Вт; $\Delta\tau = 0,5$ с; температура отключения нагревателя $50,6$ °С [4].

Рассматривая графические зависимости, представленные на рис. 3 – 5, с достаточной степенью точности можно выделить рабочие участки как плоские вершины на зависимостях $d_{1i} = f(T_s)$, $b_{1i} = f(T_s)$ и $h_i = f(T_s)$ или прямолинейные отрезки термограмм, построенные в координатах $T^* = f(\sqrt{\tau})$ и $T^* = f(1/\sqrt{\tau})$ (см. рис. 2 – 4).

Таким образом, разработаны способы определения рабочих участков термограмм и оценки коэффициентов математических моделей, описывающих термограммы на этих участках.

Список литературы

1. Многомодельные методы в микропроцессорных системах неразрушающего контроля теплофизических характеристик материалов / С. В. Мищенко [и др.] ; под ред. С. В. Мищенко. – Тамбов : Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2001. – 112 с.
2. 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.
3. Методы и средства неразрушающего теплового контроля структурных превращений в полимерных материалах : монография / Н. Ф. Майникова [и др.]. – Тамбов : Изд-во ФГБОУ ВПО «ТГТУ», 2012. – 320 с.
4. Многомодельный метод неразрушающего теплофизического контроля структурных превращений в полимерных материалах / Н. П. Жуков [и др.] // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2003. – Т. 9, № 2. – С. 196 – 198.

мы на стадии нагрева достаточно ограничиться исследованием зависимостей $d_{1i} = f(T_s)$ и $b_{1i} = f(T_s)$, а на стадии остывания – $h_i = f(T_s)$.

На рисунке 3 представлен график зависимости $d_{1i} = f(T_s)$, построенный по термограмме, снятой при следующих конструктивных условиях: радиус нагревателя $R = 4 \cdot 10^{-3}$ м; исследуемое изделие – Ф4К20. Условия испытания: $T_0 = 23$ °С; мощность на нагревателе $N = 0,7$ Вт; шаг измерения температуры $\Delta\tau = 0,5$ с [4].

На рисунке 4 представлен график зависимости $b_{1i} = f(T_s)$, построенный по термограмме, снятой при следующих конструктивных условиях: радиус нагревателя $R = 4 \cdot 10^{-3}$ м; исследуемое изделие – Ф4К20. Условия испытания: $T_0 = 23$ °С; мощность на нагревателе $N = 0,7$ Вт; шаг измерения температуры $\Delta\tau = 0,5$ с [4].

5. Химмельблау, Д. Анализ процессов статистическими методами : пер. с англ. / Д. Химмельблау. – М. : Мир, 1973. – 960 с.

6. Полунин, Е. П. Измерительная система для определения теплофизических свойств теплоизоляционных материалов / Е. П. Полунин, Н. Ю. Тужилина, Д. С. Кацуба // Психол.-пед. журн. Гаудеамус. – 2011. – Т. 2, № 18. – С. 136 – 138.

References

1. Mishchenko S.V., Muromtsev Yu.L., Zhukov N.P., Maynikova N.F., Rogov I.V. *Mnogomodelnye metody v mikroprotsessornykh sistemakh nerazrushayushchego kontrolya teplofizicheskikh kharakteristik materialov* (Multi-model techniques in micro-processor systems of nondestructive testing of thermal properties of materials), Tambov: Izdatel'stvo Tambovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta, 2001, 112 p.

2. Zhukov N.P., Maynikova N.F. *Mnogomodelnye metody i sredstva nerazrushayushchego kontrolya teplofizicheskikh svoystv materialov i izdeliy* (Multi-model methods and means of nondestructive testing of thermo-physical properties of materials and products), Moscow: Mashinostroenie-1, 2004, 288 p.

3. Maynikova N.F., Mishchenko S.V., Zhukov N.P., Rogov I.V. *Metody i sredstva nerazrushayushchego teplovogo kontrolya strukturnykh prevrashcheniy v polimernykh materialakh: monografiya* (Methods and tools for non-destructive thermal control of structural transformations in polymeric materials), Tambov: Izdatel'stvo FGBOU VPO "TGTU", 2012, 320 p.

4. Zhukov N.P., Maynikova N.F., Muromtsev Yu.L., Chekh A.S. *Transactions of the Tambov Atste Technical University*, 2003, vol. 9, no. 2, pp. 196-198.

5. Himmeblau D. *Process analysis by statistical methods*, New York, John Wiley & Sons, 1970.

6. Polunin Ye.P., Tuzhilina N.Yu., Katsuba D.S. *Psychological-Pedagogical Journal Gaudeamus*, 2011, vol. 2, no. 18, pp. 136-138.

Method for Determining Working Plots of Experimental Thermograms

A. A. Balashov, D. S. Katsuba

Tambov State Technical University, Tambov

Key words and phrases: mathematical model coefficients; multi-model method; non-destructive testing; working plot; thermogram.

Abstract: In this paper methods for estimating the coefficients of mathematical models and finding working plots of experimental thermograms using statistical criterion Durbin – Watson were developed.

© А. А. Балашов, Д. С. Кацуба, 2014

Статья поступила в редакцию 19.06.2014 г.