

ПОИСК СТРУКТУРНОГО ПЕРЕХОДА В ПОЛИМЕРЕ  
НА ТЕРМОГРАММЕ ПУТЕМ ДИСКРЕТНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ

А. А. Балашов<sup>1</sup>, И. В. Жигулина<sup>2</sup>, Н. П. Жуков<sup>1</sup>

Кафедра «Энергообеспечение предприятий и теплотехника», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия; balashovalexei@yandex.ru (1); кафедра 206 математики, ФГКВОВ ВО «Военный учебно-научный центр военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина», г. Воронеж, Россия (2)

**Ключевые слова:** дискретный фильтр; обработка сигналов; полимер; структурный переход; термограмма.

**Аннотация:** Представлен метод поиска структурного перехода в полимере на термограмме при помощи фильтра с одномерной апертурой.

Информация о структурных переходах в полимере необходима для назначения технологических режимов их переработки в изделия. Метод фиксации структурных переходов в полимере с помощью неразрушающего контроля предложен в [1]. Однако при работе информационно-измерительной системы, реализующей данный метод, возникает шум с достаточно большой амплитудой из-за теплового движения заряженных частиц в элементах электрических цепей. Для последующего определения возможных структурных переходов в полимере необходимо уменьшить соотношение сигнал/шум, что является целью данной работы.

На рисунке 1 представлена экспериментальная термограмма, зафиксированная центральной термопарой на изделии из политетрафторэтилена (ПТФЭ) при следующих условиях [1]: начальная температура опыта – 15 °С; мощность на нагревателе – 0,8 Вт; временной шаг измерения температуры – 0,5 °С; толщина образца –  $25 \cdot 10^{-3}$  м. При значениях температуры 20 и 30 °С в ПТФЭ наблюдаются эндотермические эффекты, сопровождающие внутрикристаллические переходы в твердой фазе.

Известны три кристаллические модификации ПТФЭ [2]. При температуре ниже 19,6 °С его элементарная ячейка имеет триклиническую структуру с размерами:  $a = b = 5,54 \cdot 10^{-10}$  м;  $c = 16,8 \cdot 10^{-10}$  м;  $\gamma = 119,5^\circ$ . В интервале от 19,6 до 30 °С существует гексагональная элементарная ячейка с параметрами:  $a = 5,61 \cdot 10^{-10}$  м;  $c = 16,8 \cdot 10^{-10}$  м;  $\gamma = 120^\circ$ .

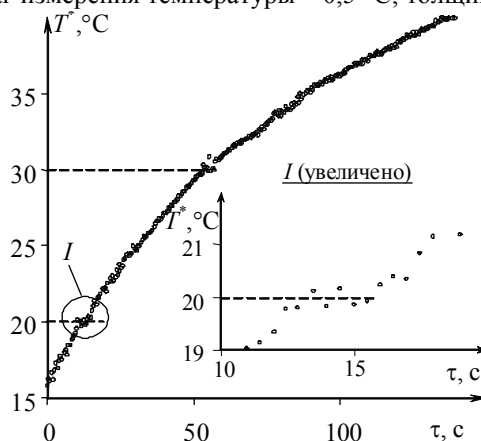


Рис. 1. Термограмма, зафиксированная на изделии из ПТФЭ

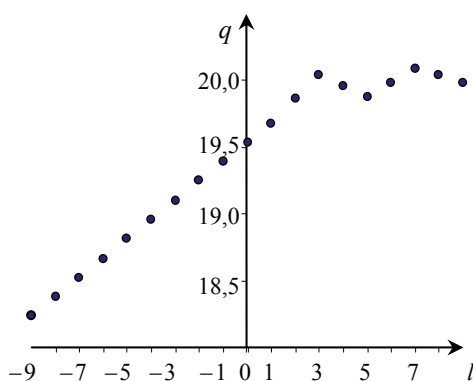


Рис. 2. Рабочий участок термограммы в виде дискретного сигнала

зует одномерное температурное поле в изделии. Данному температурному полю соответствует стадия регуляризации и на данном участке обнаруживается структурный переход при значении температуры 20 °С (см. рис. 1).

Применим метод одномерной фильтрации [5 – 7] в целях выделения сигнала в виде «плато», которое образуется структурным переходом в полимере с эндотермическим эффектом, так как известно, что структурные переходы совершаются при постоянной температуре [8].

Полученную центральную часть термограммы представим в виде дискретного сигнала, где  $l$  – номер пиксела,  $q_l$  – величина сигнала соответствующего отсчета, которую можно интерпретировать как яркость на экране монитора (рис. 2). Значения яркостей  $q_l$  пикселей  $l$  изображения (см. рис. 2) представлены в табл. 1. Известно, что при обработке в пространственной области, фильтрация осуществляется путем формирования взвешенной суммы отсчетов входного сигнала  $q_l$ , расположенных в некоторой области вокруг выходного отсчета  $q_p^{\text{ВЫХ}}$  [5 – 7].

Последовательное прохождение отсчетов сигнала через фильтр, характерное при фильтрации временных частот, при этом отсутствует. Процесс фильтрации описывается уравнением типа «автокорреляция» [5 – 7]

$$q_{p,s}^{\text{ВЫХ}} = \sum_{l=-a}^b \sum_{m=-c}^d q_{p+l,s+m} \alpha_{l,m}, \quad (1)$$

где  $\alpha_{l,m}$  – отсчеты импульсной характеристики фильтра апертурой  $(a+b+1)(c+d+1)$ ;  $a > 0$ ;  $b \geq 0$ ;  $c > 0$ ;  $d \geq 0$ .

Выражение (1) описывает однородную по пространственным координатам фильтрацию,  $p, s$  – текущие координаты пиксела изображения. Симметричная

Таблица 1

Значений яркостей  $q_i$  пикселей  $i$  изображения

$l$	-9	-8	-7	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0
$q_l$	18,23	18,38	18,52	18,67	18,81	18,96	19,1	19,25	19,39	19,54
$l$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
$q_l$	19,68	19,86	20,04	19,96	19,88	19,99	20,09	20,04	19,98	

Упорядоченность структуры при этом уменьшается, решетка расширяется, удельный объем увеличивается примерно на 1 %. При температуре выше 30 °С стабильной становится псевдогексагональная решетка с размером  $a = 5,64 \cdot 10^{-10}$  м, а изменение объема образца при этом составляет 0,08 %. Удельные теплоты переходов  $(4,0 \pm 0,5)$  и  $(1,2 \pm 0,3)$  кДж/кг соответственно [3].

При обработке термограммы необходимо определить рабочий участок [4], который характери-

вычислительная среда обладает нулевой фазочастотной пространственной характеристикой, если для всех  $l$  и  $m$  выполняется условие  $\alpha_{l,m} = \alpha_{-l,-m}$  (в случае  $m = 0$ ) [5 – 7].

Фильтрация сигналов изображений обычно решает задачу подчеркивания интересных объектов относительно фона либо ослабления помех. При регистрации термограммы в ходе проведения эксперимента возникают наводки, и наблюдается некоторая нестабильность мощности на нагревателе. Поэтому задачу определения структурных переходов в полимерах на термограмме можно решать путем выделения относительной энергии сигнала от помех. Известно, что показателем эффективности фильтрации сигналов может служить относительное изменение их энергии. В [5 – 7] предложен функционал эффективности, связывающий характеристики входного и выходного сигналов с параметрами фильтра. При этом можно разложить энергию входного сигнала в двумерный ряд Фурье

$$e = 2 \sum_{l=-a-i}^b \sum_{\substack{i=-(a+b) \\ i \neq 0}}^0 \alpha_{l+i} \alpha_l s_i \sum_{l=-a-i}^b \sum_{i=-(a+b)}^0 \alpha_{l+i} \alpha_l s_i + 2 \sum_{l=-a-i}^b \sum_{i=-(a+b)}^{-1} \alpha_{l+i} \alpha_l s_i + \\ + 2 \sum_{l=-a}^{b+i} \sum_{i=-(a+b)}^{-1} \alpha_{l-i} \alpha_l s_i + \sum_{l=-a}^b \alpha_l^2, \quad (2)$$

$$\int_{-\pi}^{\pi} \cos(i\varphi_x) S_{\text{вх}}^{\circ}(\varphi_x) d\varphi_x$$

где  $s_i = \frac{\int_{-\pi}^{\pi} \cos(i\varphi_x) S_{\text{вх}}^{\circ}(\varphi_x) d\varphi_x}{\int_{-\pi}^{\pi} S_{\text{вх}}^{\circ}(\varphi_x) d\varphi_x}$ ;  $S_{\text{вх}}^{\circ}(\varphi_x)$  – энергетический спектр входного сигнала изображения;  $\varphi_x \in [-\pi, \pi]$  – нормированная пространственная частота.

В общем случае энергетический спектр обладает центральной симметрией [5 – 7], то есть  $s_i = s_{-i}$ .

Функцию (2) можно рассматривать как функционал, заданный на множестве импульсных характеристик дискретного фильтра [5 – 7]. Тогда процедуру синтеза фильтра можно определить как выбор отсчетов его импульсной характеристики, при котором достигается экстремум.

В таблице 2 приведены значения  $s_{i,0}$ , найденные для изображения на рис. 2.

Для нахождения коэффициентов одномерного фильтра составим матрицу  $\mathbf{S}$  [5 – 7]

$$\mathbf{S} = \begin{pmatrix} s_0 & s_1 & s_2 & s_3 & \vdots & s_{18} \\ s_{-1} & s_0 & s_1 & s_2 & \vdots & s_{17} \\ s_{-2} & s_{-1} & s_0 & s_1 & \vdots & s_{16} \\ s_{-3} & s_{-2} & s_{-1} & s_0 & \vdots & s_{15} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ s_{-18} & s_{-17} & s_{-16} & s_{-15} & \vdots & s_0 \end{pmatrix}. \quad (3)$$

Таблица 2

Значения  $s_{i,0}$  для матрицы  $\mathbf{S}$

$i$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$s_i$	1	0,9488	0,8971	0,8448	0,7924	0,7399	0,6867	0,6330	0,5794	0,5259
$i$	10	11	12	13	14	15	16	17	18	
$s_i$	0,4724	0,4190	0,3655	0,3120	0,2590	0,2067	0,1545	0,1025	0,0510	

С учетом значений табл. 2 матрица  $\mathbf{S}$  примет вид

$$\mathbf{S} = \begin{pmatrix} 1,0000 & 0,9488 & 0,8971 & \vdots & 0,5794 & 0,5259 & 0,4724 & \vdots & 0,1545 & 0,1025 & 0,0510 \\ 0,9488 & 1,0000 & 0,9488 & \vdots & 0,5259 & 0,5794 & 0,5259 & \vdots & 0,1025 & 0,1545 & 0,1025 \\ 0,8971 & 0,9488 & 1,0000 & \vdots & 0,4724 & 0,5259 & 0,5794 & \vdots & 0,0510 & 0,1025 & 0,1545 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0,5794 & 0,5259 & 0,4724 & \vdots & 1,0000 & 0,9488 & 0,8971 & \vdots & 0,5794 & 0,5259 & 0,4724 \\ 0,5259 & 0,5794 & 0,5259 & \vdots & 0,9488 & 1,0000 & 0,9488 & \vdots & 0,5259 & 0,5794 & 0,5259 \\ 0,4724 & 0,5259 & 0,5794 & \vdots & 0,8971 & 0,9488 & 1,0000 & \vdots & 0,4724 & 0,5259 & 0,5794 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0,1545 & 0,1025 & 0,0510 & \vdots & 0,5794 & 0,5259 & 0,4724 & \vdots & 1,0000 & 0,9488 & 0,8971 \\ 0,1025 & 0,1545 & 0,1025 & \vdots & 0,5259 & 0,5794 & 0,5259 & \vdots & 0,9488 & 1,0000 & 0,9488 \\ 0,0510 & 0,1025 & 0,1545 & \vdots & 0,4724 & 0,5259 & 0,5794 & \vdots & 0,8971 & 0,9488 & 1,0000 \end{pmatrix}.$$

Составим матричное уравнение для нахождения маски (импульсной характеристики) фильтра

$$\mathbf{S}\mathbf{X} = \mathbf{B}, \quad (4)$$

где  $\mathbf{X}^T = (\alpha_9, \alpha_8, \dots, \alpha_0, \dots, \alpha_{-8}, \alpha_{-9})$  – отсчеты одномерного фильтра [5 – 7];  $\mathbf{B}$  – коэффициенты, полученные для эталонного изображения (плато)

$$\mathbf{B}^T = (0,1103; 0,2167; 0,3218; 0,4257; 0,5282; 0,6295; 0,7293; 0,8279; 0,9250; 1,0000; 0,9250; 0,8279; 0,7293; 0,6295; 0,5282; 0,4257; 0,3218; 0,2167; 0,1103).$$

Решая систему линейных уравнений (4) методами Гаусса и Крамера, с учетом симметрии получим маску фильтра:

$$\begin{aligned} \alpha_9 = \alpha_{-9} &= -0,8941; \alpha_8 = \alpha_{-8} = 0,0143; \alpha_7 = \alpha_{-7} = 0,0168; \\ \alpha_6 = \alpha_{-6} &= 0,0027; \alpha_5 = \alpha_{-5} = -0,0019; \alpha_4 = \alpha_{-4} = 0,0101; \\ \alpha_3 = \alpha_{-3} &= 0,0161; \alpha_2 = \alpha_{-2} = 0,033; \alpha_1 = \alpha_{-1} = 0,2058; \alpha_0 = 1,4621. \end{aligned}$$

Применим полученный одномерный фильтр к изображению на рис. 3. В таблице 3 приведены значения яркостей пикселей до ( $q_i$ ) и после ( $q_i^{\text{ВЫХ}}$ ) обработки.

Оценка эффективности обработки изображения производится по следующему соотношению

$$\varepsilon = \frac{e_o}{e_\phi}, \quad (5)$$

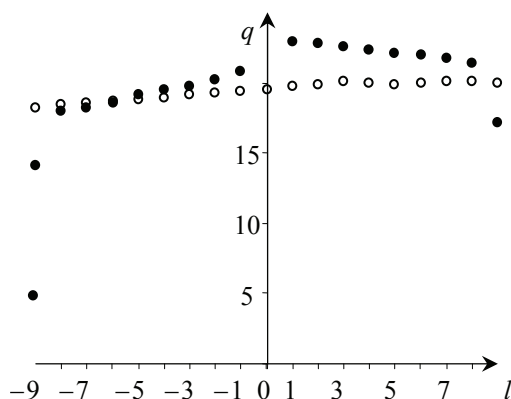


Рис. 3. Рабочий участок термограммы до (белые точки) и после (черные точки) фильтрации

где  $e_o = E_{o, \text{ВЫХ}}/E_{o, \text{ВХ}}$ ;  $e_\phi = E_{\phi, \text{ВЫХ}}/E_{\phi, \text{ВХ}}$ ;  $E$  – энергия изображения; индексы «о», «ф», «вх», «вых» относятся к объекту, фону, необработанному и обработанному изображениям соответственно [5 – 7]. Энергия изображения объекта пропорциональна сумме квадратов яркостей соответствующих пикселей. Энергия входного изображения объекта равна сумме квадратов яркостей, для рабочего участка термограммы  $E_{o, \text{ВХ}} = 7148$  усл. ед. (см. рис. 2).

Значения яркостей пикселей до  $q_l$  и после  $q_p^{\text{ВЫХ}}$  обработки

$l$	-9	-8	-7	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0
$q_l$	18,23	18,38	18,52	18,67	18,81	18,96	19,1	19,25	19,39	19,54
$q_p^{\text{ВЫХ}}$	14,14	18,01	18,19	18,60	19,14	19,46	19,69	20,19	20,78	4,82
$i$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
$q_l$	19,68	19,86	20,04	19,96	19,88	19,99	20,09	20,04	19,98	
$q_p^{\text{ВЫХ}}$	22,84	22,76	22,59	22,32	22,12	21,96	21,68	21,41	17,09	

На рисунке 3 показан результат обработки термограммы полученным фильтром одномерной апертуры. Очевидно, что на участке от пиксела с номером -9 до пиксела с номером 0 фон изображения уменьшился, а на участке от 1 до 8 пиксела – полученный сигнал выделился по отношению к реальному (зашумленному) сигналом.

Таким образом, эффективность обработки термограммы при помощи фильтра с одномерной апертурой, рассчитанной по формуле (5), составила 1,18 усл. ед. Однако, несмотря на одномерность сигнала, возможно использовать двумерную фильтрацию, то есть применить фильтр с апертурой  $3(2m+1)$ , для увеличения ранга матрицы  $S$ , и тем самым повысить эффективности обработки изображения [5–7].

#### Список литературы

1. Балашов, А. А. Информационно-измерительная система неразрушающего контроля температурных характеристик структурных переходов в полимерных материалах / А. А. Балашов, Н. Ф. Майникова, Н. П. Жуков // Приборы. – 2010. – № 12. – С. 53 – 57.
2. Горяинова, А. В. Фторопласты в машиностроении / А. В. Горяинова, Г. К. Божков, М. С. Тихонова. – М. : Машиностроение, 1971. – 232 с.
3. Кристаллизация политетрафторэтилена под действием  $\gamma$ -излучения / Ю. В. Зеленев [и др.] // Пласт. массы. – 2002. – № 1. – С. 19 – 22.
4. Многомодельные методы в микропроцессорных системах неразрушающего контроля теплофизических характеристик материалов : учеб. пособие для студентов высш. учеб. заведений / С. В. Мищенко [и др.]. – Тамбов : Изд-во ФГБОУ ВПО «ТГТУ», 2012. – 112 с.
5. Обработка многомерных сигналов: в 2 кн. Кн. 1 : Линейная многомерная дискретная обработка сигналов. Методы анализа и синтеза : монография / под ред. А. В. Богословского. – М. : Радиотехника, 2013. – 168 с.
6. Корреляционный анализ изображений изотропными фильтрами / А. В. Богословский [и др.] // Радиотехника. – 2012. – № 4. – С. 43 – 46.
7. Bogoslovsky, A. V. A Way of Energy Analysis for Image and Video Sequence Processing / A. V. Bogoslovsky, I. V. Zhigulina // Intelligent Systems Reference Library. – 2015. – Vol. 73. – P. 183 – 210.
8. Бартенев, Г. М. Физика полимеров / Г. М. Бартенев, С. Я. Френкель. – Л. : Химия, 1990. – 429 с.

## Search for Structural Transition in Polymers on the Thermogram by Digital Filtering

A. A. Balashov<sup>1</sup>, I. V. Zhigulina<sup>2</sup>, N. P. Zhukov<sup>1</sup>

*Department "Power Supply of Enterprises and Heat Engineering", TSTU,  
Tambov, Russia (1); balashovalexei@yandex.ru; 206 Department of Mathematics,  
Military Training and Research Center of the Air Force  
"Air Force Academy named after N. E. Zhukovsky  
and Yuri Gagarin", Voronezh, Russia (2)*

**Keywords:** digital filter; polymer; signal processing; structural transition; thermogram.

**Abstract:** We developed a method of searching for a structural transition in the polymer thermogram using a filter with one-dimensional aperture.

### References

1. Balashov A.A., Mainikova N.F., Zhukov N.P. [Information-measuring system for non-destructive testing temperature characteristics of structural transitions in polymer materials], *Pribory [Instruments]*, 2010, no. 12, pp. 53-57. (In Russ., abstract in Eng.)
2. Goryainova A.V., Bozhkov G.K., Tikhonova M.S. *Ftoroplasty v mashinostroenii* [Fluorocarbon polymer in mechanical], Moscow: Mashinostroenie, 1971, 232 p. (In Russ.)
3. Zelenev Yu.V., Koptelov A.A., Sadovnichii D.N., Shlenskii O.F., Valgin D.D. [Crystallization of polytetrafluoroethylene under the influence of  $\gamma$ -radiation], *Plasticheskie massy* [International Polymer Science and Technology], 2002, no. 1, pp. 19-22. (In Russ.)
4. Mishchenko S.V., Muromtsev Yu.L., Zhukov N.P., Mainikova N.F., Rogov I.V., Popov O.N. *Mnogomodel'nye metody v mikroprotsessornykh sistemakh nerazrushayushche-go kontrolya teplofizicheskikh kharakteristik materialov: ucheb. posobie dlya studentov vyssh. ucheb. zavedenii* [The multi-methods in microprocessor systems, non-destructive testing of thermal properties of materials: Textbook. Benefit for Studioing Executive. Proc. institutions], Tambov: Izd-vo FGBOU VPO "TGTU", 2012, 112 p. (In Russ.)
5. Bogoslovskogo A.V. *Obrabotka mnogomernykh signalov: v 2 kn. Kn. 1 : Lineinaya mnogomernaya diskretnaya obrabotka signalov. Metody analiza i sinteza. Monografiya* [Processing of multidimensional signals: a 2 kN. Book 1: The linear multivariate discrete signal processing. Methods of analysis and synthesis. Monograph], Moscow: Radiotekhnika, 2013, 168 p. (In Russ.)
6. Bogoslovskii A.V., Zhigulina I.V., Basenkov I.A., Skomorokhov V.V. [Correlation Analysis of Images by Isotropic Standards], *Radiotekhnika* [Radioengineering], 2012, no. 4, pp. 43-46. (In Russ., abstract in Eng.)
7. Bogoslovsky A.V., Zhigulina I.V. A Way of Energy Analysis for Image and Video Sequence Processing, *Intelligent Systems Reference Library*, 2015, vol. 73, pp. 183-210.
8. Bartenev G.M., Frenkel' S.Ya. *Fizika polimerov* [Polymer Physics], Leningrad: Khimiya, 1990, 429 p. (In Russ.)

## Suche des strukturellen Übergangs im Polymer auf dem Thermogramm mittels der diskreten Filtrierung

**Zusammenfassung:** Es ist die Methode der Suche des strukturellen Übergangs im Polymer auf dem Thermogramm mit Hilfe des Filters mit der eindimensionalen Apertur dargelegt.

---

## Recherche de la transition structurelle dans le polymère sur thermogramme par la voie de la filtration discrète

**Résumé:** Est présentée la méthode de la recherche de la transition structurelle dans le polymère sur thermogramme à l'aide d'un filtre avec une ouverture unidimensionnelle.

---

**Авторы:** *Балашов Алексей Александрович* – кандидат технических наук, доцент кафедры «Энергообеспечение предприятий и теплотехника», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия; *Жигулина Ирина Викторовна* – кандидат технических наук, доцент кафедры 206 математики, ФГКВБОУ ВО «Военный учебно-научный центр военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина», г. Воронеж, Россия; *Жуков Николай Павлович* – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Энергообеспечение предприятий и теплотехника», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.

**Рецензент:** *Дмитриев Олег Сергеевич* – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Физика», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.

---