

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОПЕРЕНОСА НА СТАДИИ ОСТЫВАНИЯ В МЕТОДЕ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ

Н. Ф. Майникова, Н. П. Жуков

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

Рецензент д-р техн. наук, профессор Т. И. Чернышова

Ключевые слова: адекватность; моделирование; неразрушающий контроль; сферическое полупространство; температурное поле; теплофизические свойства; численное моделирование.

Аннотация: Исследована адекватность математической модели распространения тепла в сферическом полупространстве реальному тепловому процессу метода неразрушающего теплового контроля твердых материалов. Рассмотрена стадия остывания. Представлен пример численной реализации метода на объекте из стекла.

Обозначения: a – температуропроводность, $\text{м}^2/\text{с}$; q – плотность теплового потока, $\text{Вт}/\text{м}^2$; $R_{\text{пл}}$ – радиус плоского нагревателя, м ; R – радиус сферического нагревателя, м ; T – температура, К ; λ – теплопроводность, $\text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$; $c\rho$ – объемная теплоемкость, $\text{Дж}/(\text{м}^3\cdot\text{К})$; r, z – пространственные координаты, м ; ε – тепловая активность, $(\text{Вт}\cdot\text{с}^{0,5})/(\text{м}^2\cdot\text{К})$; ρ – плотность, $\text{кг}/\text{м}^3$; τ – время, с .

Введение

Рассмотрим измерительную схему многомодельного метода неразрушающего определения теплофизических свойств (ТФС) твердых материалов (рис. 1). Тепловое воздействие на исследуемое тело (например из полимерного материала) осуществляется с помощью плоского нагревателя, выполненного в виде тонкого диска радиусом $R_{\text{пл}}$, встроенного в подложку

Майникова Нина Филипповна – доктор технических наук, профессор кафедры «Энергообеспечение предприятий и теплотехника»; Жуков Николай Павлович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Энергообеспечение предприятий и теплотехника», e-mail: teplotehnika@nnn.tstu.ru; ТамбГТУ, г. Тамбов.

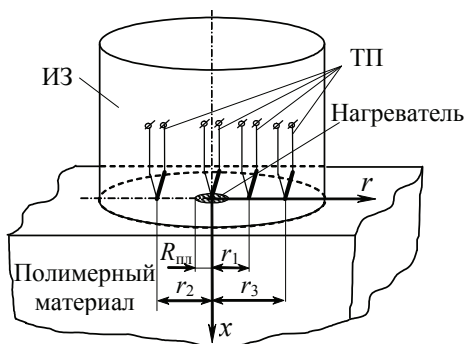


Рис. 1. Измерительная схема

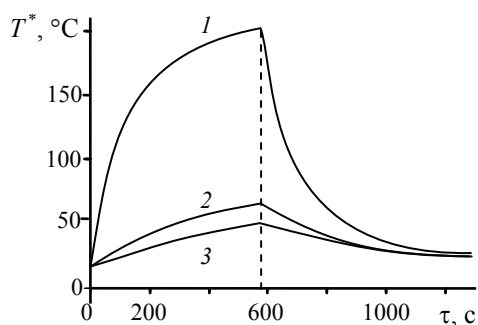


Рис. 2. Термограммы для ПТФЭ:
1 – на оси нагревателя;
2, 3 – на расстояниях 7 и 9 мм от оси

измерительного зонда (ИЗ). Температурное распределение контролируется несколькими (не менее трех) термоприемниками (ТП). Реализация метода осуществляется измерительными системами, детальное описание которых представлено в работах [1 – 3].

На рис. 2 показаны термограммы, полученные экспериментально на изделии из политетрафторэтилена (ПТФЭ) [1]. На каждой из термограмм выделим несколько участков, соответствующих различным состояниям температурного поля исследуемой системы. Так для термограммы, зафиксированной центральным ТП на изделии, характерны восемь участков (рис. 3).

Участку I соответствует одномерное температурное поле в локальной области исследуемого тела (вблизи нагревателя). Тепловые потоки, поступающие в изделие и зонд, изменяются во времени, так как между нагревателем и исследуемым телом имеется термическое сопротивление, нагреватель обладает инерционностью. Участку II отвечает одномерное температурное поле, процесс проходит стадию регуляризации в локальной области исследуемого тела, расположенной вблизи нагревателя и термоприемников [1, 4, 5].

Участку III соответствует двумерное температурное поле в образце, поскольку нельзя пренебречь распространением тепла в радиальном направлении. Участку IV отвечает тепловой процесс, вышедший на стадию регуляризации. В локальной области исследуемого полимерного материала

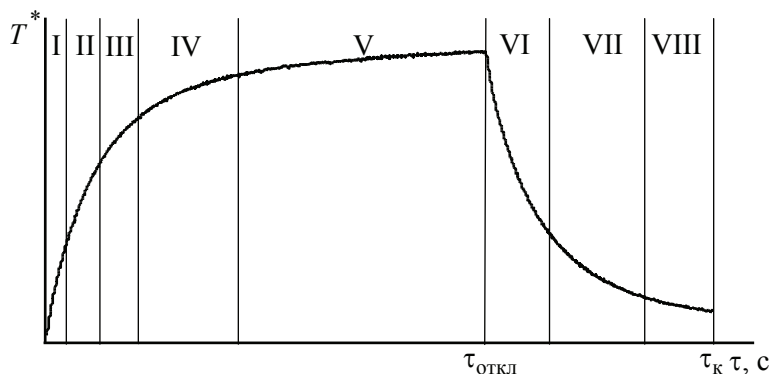


Рис. 3. Термограмма 1 (см. рис. 2) с выделенными участками

ла формируется температурное поле, близкое к одномерному полусферическому. На участке V нарушаются условия полуограниченности исследуемого тела.

После отключения нагревателя ($\tau > \tau_{\text{откл}}$) на стадии остывания можно выделить участки: VI – тепловые потоки изменяются во времени; VII – тепловой процесс проходит стадию регуляризации; VIII – тепловой процесс изменяется.

Участки термограммы II, IV и VII – *рабочие*, так как 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 [1, 4, 5].

Для разработки математических моделей определения ТФС материалов при неразрушающем контроле использована следующая аналогия развития теплового процесса: на начальной стадии развития теплового процесса рассматривается задача о распространении тепла от бесконечного плоского нагревателя с плотностью теплового потока q в плоском полупространстве (модель A). При больших значениях τ – в предположении, что плоский круглый нагреватель заменен эквивалентным ему поверхностным сферическим, рассматриваются задачи о распространении тепла в сферическом полупространстве (при нагреве и остывании – модели B и C). Постановки и решения краевых задач теплопроводности по моделям A, B и C представлены в работах [1, 4, 5].

Стадия остывания

Рассмотрим стадию остывания, соответствующую модели C. Решение задачи, описывающей процесс распространения тепла в исследуемом объекте контроля (первое тело) по модели C для поверхностного слоя ($x = 0$) в предположении отсутствия структурного перехода в полимерном материале (см. рис. 1 и 2) имеет вид [1, 4, 5]:

$$T_1(r, \tau) = \frac{2qR^3(\varepsilon_1 + \varepsilon_2)}{r\sqrt{\pi}(\lambda_1 + \lambda_2)^2} \left(\frac{(r - R)(\lambda_1 + \lambda_2)}{\sqrt{a_1}R(\varepsilon_1 + \varepsilon_2)} + 1 \right) \frac{1}{\sqrt{\tau}}. \quad (1)$$

при $r = R$

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

где индексы 1 и 2 относятся соответственно к материалу исследуемого тела и материалу, из которого изготовлена подложка измерительного зонда.

При этом принималось допущение о том, что конечное распределение температуры в математической модели процесса теплопереноса от поверхностного сферического нагревателя после окончания действия источника тепла будет близко к стационарному [6]. Так как в реальном эксперименте используется круглый плоский нагреватель, то необходимо определить продолжительность стадии нагрева и соотношение радиусов $R_{\text{пл}}$ и R , при котором температурные поля на стадии остывания, создаваемые круглым плоским и сферическим поверхностным нагревателями будут близкими.

Соотношение радиусов $R_{пл}$ и R , при котором температурные поля, создаваемые при нагреве круглым плоским и сферическим поверхностным источниками постоянной мощности, будут идентичными, $R = R_{пл}/2$. Данное соотношение имеет место при локальной регуляризации тепловых потоков в ограниченной зоне системы «изделие – зонд» и справедливо для участка IV термограммы [1].

Если отключение нагревателя происходит на участке V термограммы, где тепловой процесс не находится в стадии регуляризации, то соотношение радиусов $R_{пл}$ и R изменится, так как отношение теплового потока в любой точке тела к потоку тепла на его поверхности зависит от времени [6 – 8].

Определение условий адекватности тепловых процессов проводилось следующим образом. Подбирались такие значения радиуса сферического поверхностного нагревателя и продолжительности стадии нагрева, чтобы температурное поле, полученное с использованием численного моделирования двумерных полей методом конечных элементов (с помощью пакета ELCUT [9]), на рабочем участке при остывании было идентично температурному полю, построенному с использованием полученной математической модели (2).

Пример численной реализации

Последовательность действий проиллюстрируем следующим примером. Материал исследуемого изделия – стекло ТФ. Подложка зонда изготовлена из пенополиуретана марки «Рипор».

Термограмма, построенная для системы двух тел с использованием численного моделирования методом конечных элементов [9], представлена на рис. 4, а. Термограммы, представленные на рис. 4, б: в плоскости контакта действуют плоский круглый источник тепла (численное моделирование, линия 1) и сферический поверхностный нагреватель (модель (2), линия 2).

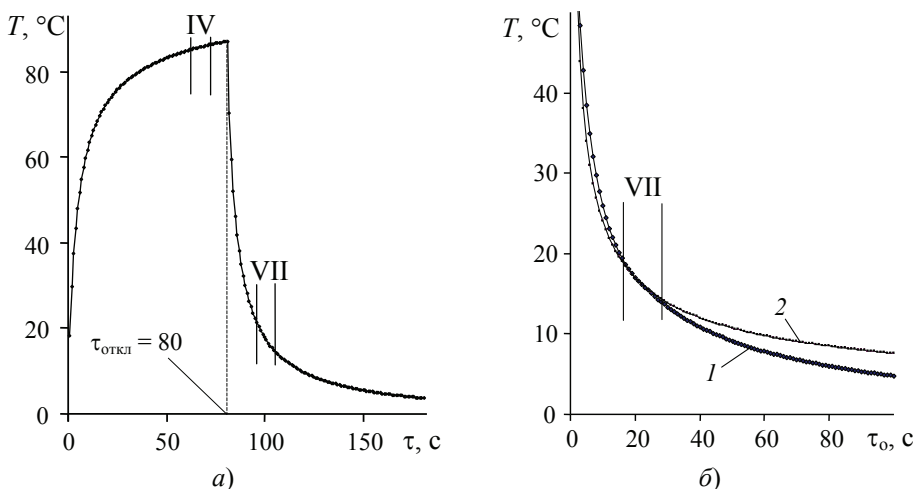


Рис. 4. Термограммы, построенные для системы двух полуограниченных тел с различными ТФС по данным примера:

а – стадии нагрева и остывания, численный расчет; б – стадия остывания (линия 1 получена численно, линия 2 – по модели (2))

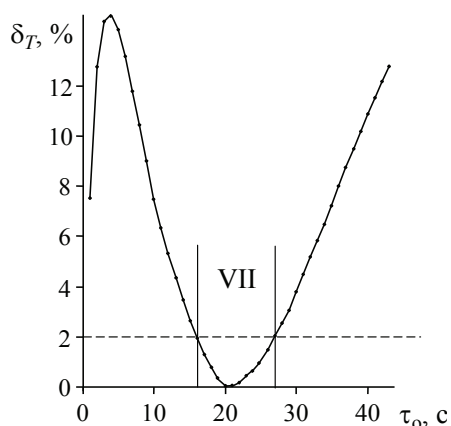


Рис. 5. Зависимость $\delta_T = f(\tau)$, построенная по термограммам 1, 2 рис. 4, б

Условия численного моделирования:

$$q = 20000 \text{ Вт/м}^2;$$

$$\varepsilon_1 = 848,3 \text{ (Вт}\cdot\text{с}^{0,5})/(\text{м}\cdot\text{К});$$

$$\lambda_1 = 0,699 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К});$$

$$\varepsilon_2 = 42,2 \text{ (Вт}\cdot\text{с}^{0,5})/(\text{м}\cdot\text{К});$$

$$\lambda_2 = 0,028 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К});$$

$$R_{\text{пл}} = 0,004 \text{ м}; R = 0,00141 \text{ м};$$

продолжительность стадии нагрева – 80 с; τ_o – время от момента отключения нагрева и начала стадии остывания.

Определим относительную погрешность значений температуры в точке контроля, расположенной на оси нагревателя в плоскости контакта подложки измерительного зонда с исследуемым телом,

$$\delta_T = \frac{T_1 - T_2}{T_1} \cdot 100 \%$$

Погрешность δ_T обусловлена различием математических моделей распространения тепла от плоского круглого и сферического поверхностного источников тепла на стадии остывания. На рисунке 5 представлена зависимость δ_T от времени.

Для условий примера на участке VII термограммы величина $\delta_T \leq 2 \%$.

Очевидно, что идентичность температурных полей, создаваемых круглым плоским и сферическим поверхностным нагревателями, будет существенно зависеть от продолжительности стадии нагрева и, следовательно, от температуры изделия в конце стадии нагрева.

Таким образом, необходимо найти такую температуру изделия (или продолжительность стадии нагрева от круглого плоского источника тепла), которая соответствовала бы распределению температуры, близкому стационарному при нагреве от сферического поверхностного нагревателя.

Анализируя данные, представленные на рис. 4 и 5, можно предположить, что время до момента отключения круглого плоского нагревателя следует устанавливать в зависимости от теплофизических свойств материала рассматриваемого изделия. Имитационное моделирование, выполненное ранее и представленное в работе [1], показало, что время до момента отключения нагревателя наиболее существенно зависит от теплопроводности материала исследуемого изделия.

При имитационном моделировании теплового процесса в системе «изделие – зонд» на стадии остывания учитывались результаты опытов, для которых $\delta_T \leq 3 \%$. Варьировали плотность теплового потока q и ТФС изделия [1].

Приведем соотношение радиусов нагревателей $R_{\text{пл}}$ и R , согласно уравнению (2)

$$R = \frac{R_{\text{пл}}}{2\sqrt{2}}. \quad (3)$$

Продолжительность стадии нагрева (до момента отключения нагревателя) подбиралась так, чтобы температурное поле, полученное с использованием численного моделирования от круглого плоского нагревателя на рабочем участке термограммы, было близко температурному полю, построенному по модели сферического полупространства (2) – модели С ($\delta_T \leq 3\%$); $T_{\text{откл}}$ – температура отключения, которая соответствует температуре изделия в конце стадии нагрева.

Максимальное значение температуры материала исследуемого изделия при достижении стационарной стадии с учетом соотношения (3) определим из уравнения [6]

$$T_{\text{ст}} = \frac{qR_{\text{пл}}}{\sqrt{2}(\lambda_1 + \lambda_2)}.$$

Значение температуры материала исследуемого изделия, при достижении которой необходимо отключить плоский нагреватель, найдем исходя из следующих соображений.

Определим критерий K , с помощью которого найдем значение температуры отключения $T_{\text{откл}}$ источника тепла:

$$K = \frac{T_{\text{ст}}}{T_{\text{откл}}}.$$

Запишем модель (2)

$$T(R_{\text{пл}}, \tau) = \frac{q(\varepsilon_1 + \varepsilon_2)R_{\text{пл}}^2}{4(\lambda_1 + \lambda_2)^2 \sqrt{\pi\sqrt{\tau}}}. \quad (4)$$

В результате проведенного регрессионного анализа, учитывая, что зависимость $K = f(\lambda_1)$ линейная, получим уравнение

$$K = 0,8388 + 0,0793\lambda_1. \quad (5)$$

Таким образом, если по окончании участка IV термограммы определить значение коэффициента теплопроводности материала исследуемого изделия λ_1 (что предусматривается разработанным способом определения ТФС [1]), а затем вычислить значение критерия K , то можно найти температуру нагревателя $T_{\text{откл}}$, при которой необходимо закончить стадию нагрева

$$T_{\text{откл}} = \frac{T_{\text{ст}}}{K}. \quad (6)$$

Для условий примера на участке VII термограммы (см. рис. 5) величина $\delta_T \leq 2\%$.

Заключение

1. Рассмотрена стадия остывания, реализуемая в многомодельном методе неразрушающего определения теплофизических свойств материалов, и определены условия адекватности математической модели распространения тепла реальному теплопереносу.

2. При определении продолжительности стадии нагрева установлено, что время отключения плоского круглого нагревателя необходимо назначать в зависимости от теплопроводности исследуемого материала.

3. Значение теплопроводности материала исследуемого изделия следует вычислять по окончании участка IV термограммы.

4. Найден критерий, позволяющий определить температуру нагревателя, при достижении которой необходимо его отключить.

5. Определено соотношение радиусов круглого плоского и сферического поверхностного нагревателей, при котором температурные поля на стадии остывания будут близкими.

Список литературы

1. 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.

2. Жуков, Н. П. Измерительно-вычислительная система неразрушающего теплофизического контроля / Н. П. Жуков, Н. Ф. Майникова // Приборы и техника эксперимента. – 2005. – № 2. – С. 153–154.

3. Акулинин, И. Н. Автоматизированная система для определения зависимости теплофизических свойств твердых полимерных материалов от температуры и давления / И. Н. Акулинин, П. С. Беляев // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2010. – Т. 16, № 3. – С. 545 – 549.

4. Zhukov, N. P. Multimodel Method of Nondestructive Determination of the Thermophysical Properties of Solid Materials / N. P. Zhukov, N. F. Mainikova // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. – 2005. – Vol. 76, No. 6. – P. 1104 – 1112.

5. Многомодельный метод неразрушающего определения теплофизических свойств твердых материалов / Н. П. Жуков [и др.] // Инженер.-физ. журн. – 2012. – Т. 85, № 1. – С. 188 – 194.

6. Козлов, В. П. Двумерные осесимметричные нестационарные задачи теплопроводности / В. П. Козлов ; под ред. А. Г. Шашкова. – Минск : Наука и техника, 1986. – 392 с.

7. Определение условий адекватности модели распределения тепла в плоском полупространстве реальному процессу при теплофизическом контроле / Н. Ф. Майникова [и др.] // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2006. – Т. 12, № 3А. – С. 610 – 616.

8. Моделирование теплопереноса в методе неразрушающего теплофизического контроля. Часть I. Стадия нагрева / Н. Ф. Майникова [и др.] // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2007. – Т. 13, № 1А. – С. 39 – 45.

9. ELCUT: Моделирование двумерных полей методом конечных элементов. Версия 5.1. Руководство пользователя / Производств. кооператив ТОР. – СПб. : Производств. кооператив ТОР, 2003. – 249 с.

References

1. Zhukov N.P., Mainikova N.F. *Mnogomodel'nye metody i sredstva nerazrushayushchego kontrolya teplofizicheskikh svoystv materialov i izdelii* (The multi-methods and means of nondestructive kontrolya thermo-physical properties of materials and products), Moscow: Mashinostroenie-1, 2004, 288 p.
2. Zhukov N.P., Mainikova N.F. *Pribory i tekhnika eksperimenta*, 2005, no. 2, pp. 153-154.
3. Akulinin I.N., Belyaev P.S. *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2010, vol. 16, no. 3, pp. 545-549.
4. Zhukov N.P., Mainikova N.F. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2005, vol. 76, no. 6, pp. 1104-1112.
5. Zhukov N.P., Mainikova N.F., Rogov I.V., Pudovkina E.V. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2012, vol. 85, no. 1, pp. 203-209.
6. Kozlov V.P. *Dvumernye osesimmetrichnye nestatsionarnye zadachi teploprovodnosti* (Two-dimensional axisymmetric non-stationary heat conduction problem), Minsk: Nauka i tekhnika, 1986, 392 p.
7. Mainikova N.F., Zhukov N.P., Balashov A.A., Nikulin S.S. *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2006, vol. 12, no. 3A, pp. 610-616.
8. Mainikova N.F., Zhukov N.P., Chekh A.S., Nikulin S.S. *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2007, vol. 13, no. 1A, pp. 39-45.
9. Proizvodstvennyi kooperativ TOR. *ELCUT: Modelirovanie dvumernykh polei metodom konechnykh elementov. Versiya 5.1. Rukovodstvo pol'zovatelya* (Simulation of two-dimensional field using finite element method. Version 5.1. User Manual), St. Petersburg: Proizvodstvennyi kooperativ TOR, 2003, 249 p.

Modeling of Heat Transfer at the Cooling Stage in Non-Destructive Testing

N. F. Mainikova, N. P. Zhukov

Tambov State Technical University, Tambov

Key words and phrases: non-destructive test; numerical investigation; simulation; spherical semispace; temperature field; thermo-physical properties; validity;

Abstract: We investigated the adequacy of the mathematical model of heat propagation in the spherical half to the actual thermal process of non-destructive thermal control of solid materials. We considered the stage of cooling. The example of the numerical realization of the method on an object made of glass was described.

© Н. Ф. Майникова, Н. П. Жуков, 2015