

ИДЕНТИЧНОСТЬ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ ОТ ПЛОСКОГО И СФЕРИЧЕСКОГО НАГРЕВАТЕЛЕЙ В МЕТОДЕ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО ТЕПЛОФИЗИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ

Н. Ф. Майникова, Н. П. Жуков

*Кафедра «Энергообеспечение предприятий и теплотехника»;
ФГБОУ ВО «ТГТУ»; teplotehnika@nnn.tstu.ru*

Ключевые слова: адекватность; математическая модель; неразрушающий контроль; стадия остывания; сферическое полупространство; температурное поле; тепловое воздействие; тепловой анализ; теплофизические свойства; численный расчет.

Аннотация: Рассмотрен многомодельный метод неразрушающего определения теплофизических свойств твердых материалов. Повышение точности метода на стадии остывания достигается за счет своевременного окончания стадии нагрева. Показана идентичность температурных полей от плоского круглого и модельного сферического поверхностного нагревателей в методе неразрушающего контроля при реализации стадии остывания.

Обозначения и аббревиатуры

q – плотность теплового потока, Вт/м²;
 $R_{пл}$ – радиус плоского нагревателя, м;
 R – радиус сферического нагревателя, м;
 T – избыточная температура, К;
 λ – теплопроводность, Вт/(м·К);
 r, z – пространственные координаты, м;
 ε – тепловая активность, Вт·с^{0.5}/(м²·К);
 ρ – плотность, кг/м³;
 τ – время, с;
ИЗ – измерительный зонд;
НК – неразрушающий контроль;

ПТФЭ – политетрафторэтилен;
ТП – теплоприемник;
ТФС – теплофизические свойства.

Индексы

1 – исследуемое тело;
2 – подложка зонда;
пл – плоский;
о – остывание;
откл – отключение.

Рассматривается многомодельный метод неразрушающего определения теплофизических свойств изделий из твердых неметаллических материалов. Метод относится к косвенным измерениям, поскольку в ходе эксперимента непосредственно измеряется не сама теплофизическая величина, а фиксируются термограммы (зависимости температуры от времени). Значения ТФС определяют в зависимости от параметров аналитических моделей, описывающих термограмму на рабочих участках, используя регулярные тепловые режимы на моделях плоского и сферического полупространств [1, 2].

Метод обеспечивает повышение точности, достоверности результатов и оперативность измерений за счет использования нескольких рабочих участков термограмм, полученных при реализации стадий нагрева и остывания.

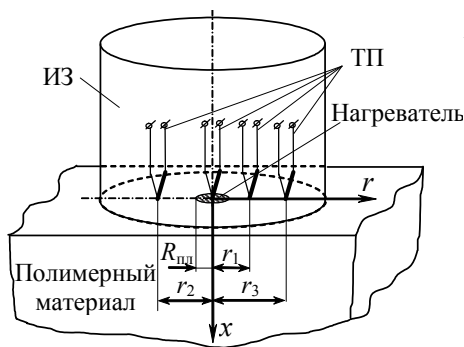


Рис. 1. Измерительная схема

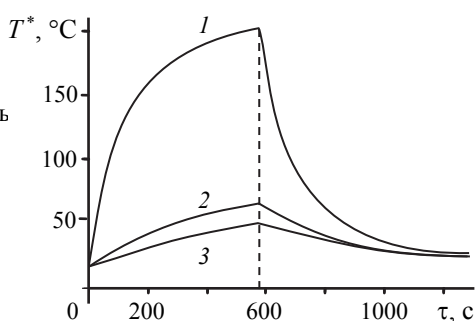


Рис. 2. Термограммы для ПТФЭ:
1 – на оси нагревателя;
2, 3 – на расстояниях 7 и 9 мм от оси

Тепловое воздействие на исследуемое тело (например, из полимерного материала) осуществляется с помощью плоского нагревателя, выполненного в виде тонкого диска радиусом $R_{пл}$, встроенного в подложку ИЗ. Температурное распределение контролируется несколькими ТП, расположенными на контактной поверхности подложки ИЗ (рис. 1).

На рисунке 2 представлены термограммы, полученные экспериментально на изделии из ПТФЭ согласно измерительной схеме. Термограмма, зарегистрированная четвертым ТП, наиболее удаленным от центральной плоскости контакта ИЗ с объектом, на рис. 2 не показана, так как она практически совпадает с кривой 3; T^* – температура изделия, равная сумме значений температуры начальной и избыточной T . На каждой из термограмм можно выделить несколько участков, соответствующих различным состояниям температурного поля.

Для термограммы, зафиксированной центральным ТП на поверхности изделия, характерны восемь участков (рис. 3). 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, 2]. Оценка случайных и систематических погрешностей определения ТФС твердых материалов на стадии нагрева при реализации данного метода контроля приведена в работах [3, 4].

Рассмотрим стадию остывания: рабочий участок термограммы – VII; переходные участки – VI и VIII [5].

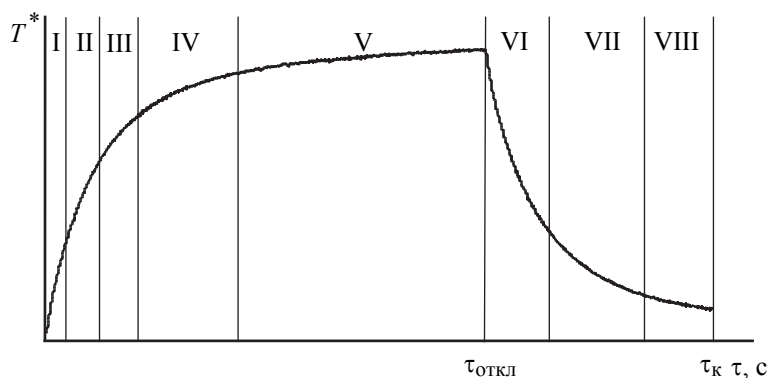


Рис. 3. Термограмма I (см. рис. 2) с выделенными участками

Ранее получена математическая модель, описывающая процесс распределения тепла в исследуемой системе на рабочем участке при реализации стадии остывания [6],

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

При получении математической модели:

– плоский круглый нагреватель постоянной мощности заменен эквивалентным ему сферическим поверхностным;

– принималось допущение о том, что конечное распределение температуры при теплопереносе от плоского нагревателя после окончания действия источника тепла будет близко к стационарному [1].

В работе [5] определены условия адекватности математической модели (1) распространения тепла реальному теплопереносу, предложен критерий, позволяющий найти температуру нагревателя, при достижении которой необходимо закончить стадию нагрева.

В данной работе представлено численное моделирование температурных полей методом конечных элементов, дано сравнение относительных погрешностей значений температуры в центральной точке контроля изделия из ПТФЭ от времени при различных значениях температуры: *пример 1* – продолжительность нагрева 380 с (рис. 4 – 6); *пример 2* – 200 с (рис. 7 и 8).

Зависимость относительной погрешности температуры

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

от времени на термограммах 1 и 2 (см. рис. 5 и 7) обусловлена различием математических моделей распространения тепла от плоского круглого и сферического поверхностного источников тепла на стадии остывания.

Кривая 1, представленная на рис. 5, построена по модели (1). Термограмма 2 построена с использованием численного моделирования

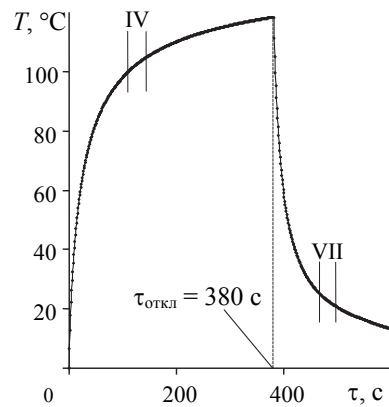


Рис. 4. Термограмма с выделенными рабочими участками при нагреве и остывании для данных примера 1

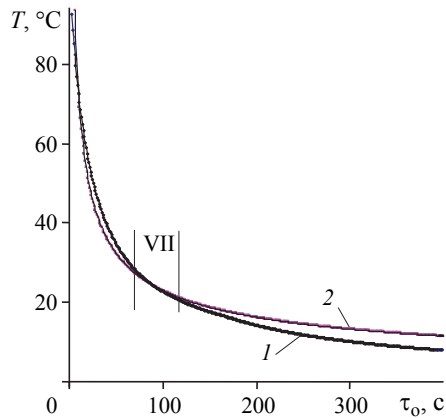


Рис. 5. Термограммы, построенные для стадии остывания системы по данным примера 1:

1 – плоский круглый нагреватель (численное моделирование); 2 – сферический поверхностный нагреватель, расчеты выполнены с использованием математической модели (1)

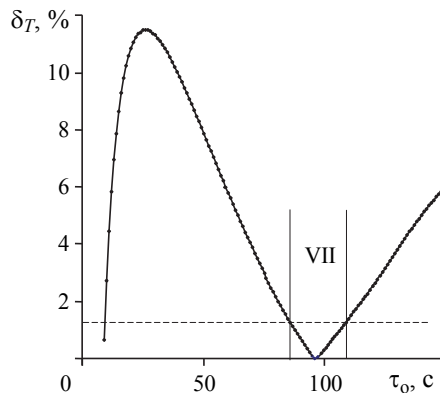


Рис. 6. Зависимость $\delta_T = f(\tau_0)$, построенная по термограммам 1, 2 (см. рис. 5)

методом конечных элементов с помощью пакета ELCUT [7]. Конструктивные и режимные условия: $q = 10000 \text{ Вт/м}^2$; $R_{\text{пл}} = 0,004 \text{ м}$; $R = 0,014 \text{ м}$; $\varepsilon_1 = 743,47 \text{ Вт}\cdot\text{с}^{0,5}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$; $\lambda_1 = 0,25 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$; $\varepsilon_2 = 42,17 \text{ Вт}\cdot\text{с}^{0,5}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$; $\lambda_2 = 0,028 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$. Продолжительность нагрева – 380 с. Время, прошедшее от начала стадии остывания, – τ_0 , с. Исследуемый материал – ПТФЭ. На термограммах выделены рабочие участки, соответствующие регуляризации теплопереноса.

Зависимость относительной погрешности δ_T от времени на термограммах (кривые 1 и 2 на рис. 5), обусловленная различием математических моделей распространения тепла от плоского круглого и сферического поверхностного источников тепла на стадии остывания, приведена на рис. 6.

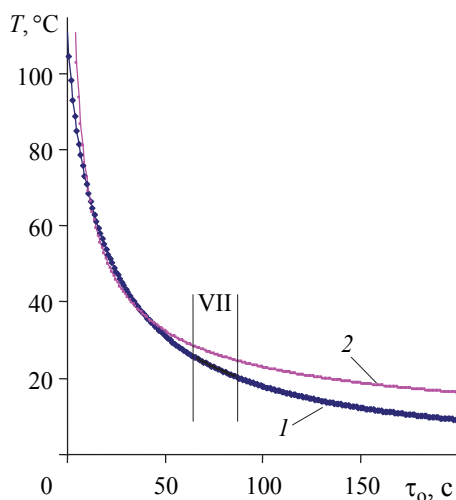


Рис. 7. Термограммы, построенные по данным примера 2:

1 – плоский круглый нагреватель (численное моделирование); 2 – сферический поверхностный нагреватель, расчеты выполнены с использованием математической модели (1)

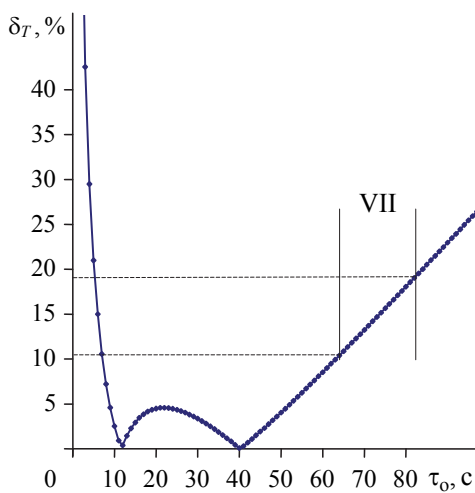


Рис. 8. Зависимость $\delta_T = f(\tau_0)$, построенная по термограммам 1, 2 (см. рис. 7)

Из представленных данных видно, что для условий примера 1 на VII рабочем участке термограммы величина δ_T менее 1,5 %.

На рисунке 7 представлен график для примера 2, в котором продолжительность стадии нагрева составила 200 с. Расчеты выполнены при тех же условиях, что и в примере 1. Результаты сравнения термограмм показаны для случая, когда в плоскости контакта (подложка зонда из пенополиуретана марки «Рипор» – исследуемое изделие из ПТФЭ) действуют плоский круглый источник тепла в виде диска (кривая 1, численное моделирование) и сферический поверхностный нагреватель (кривая 2, расчеты выполнены с использованием модели (1)).

Уменьшение продолжительности стадии нагрева до 200 с (по сравнению с примером 1, где время нагрева равнялось 380 с) привело к существенному росту величины δ_T от времени, обусловленной различиями распространения тепла от плоского круглого и сферического поверхностного источников тепла. На стадии остывания в зоне рабочего участка (рис. 8) величина δ_T находится в пределах 10 – 20 %. Это не позволяет использовать рабочий участок термограммы на стадии остывания для определения ТФС при данных условиях реализации метода.

Данные графиков (см. рис. 5, 7) подтверждают, что идентичность температурных полей, создаваемых плоским круглым и сферическим поверхностными нагревателями, будет существенно зависеть от продолжительности стадии нагрева.

На рисунках 9 и 10 представлены распределения температуры и плотности теплового потока в изделии из ПТФЭ на момент времени 480 с от действия плоского круглого нагревателя постоянной мощности в виде диска, встроенного в подложку ИЗ (380 с – стадия нагрева и 100 с – остывание).

Численный расчет выполнялся для случая наличия идеальной теплоизоляции между изделием из ПТФЭ и подложкой ИЗ, выполненной из пенополиуретана марки «Рипор».

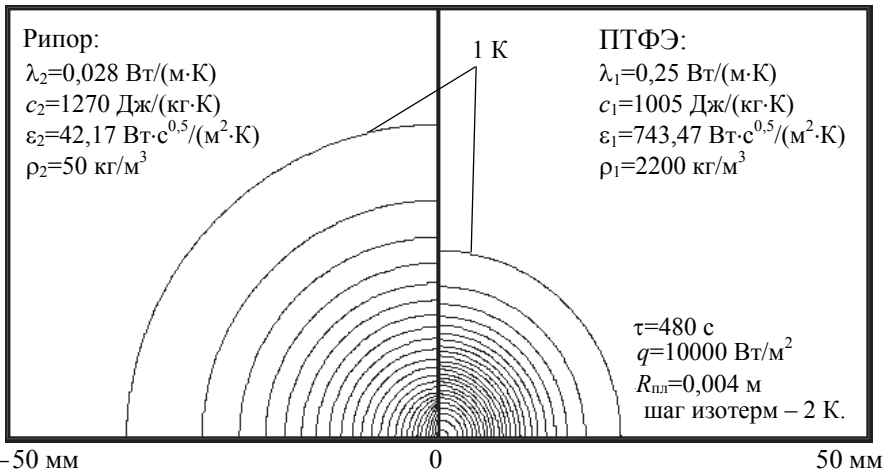


Рис. 9. Температурное поле от плоского круглого нагревателя постоянной мощности в системе двух полуограниченных тел при идеальной теплоизоляции между ними. Стадия остывания (VII участок термограммы)

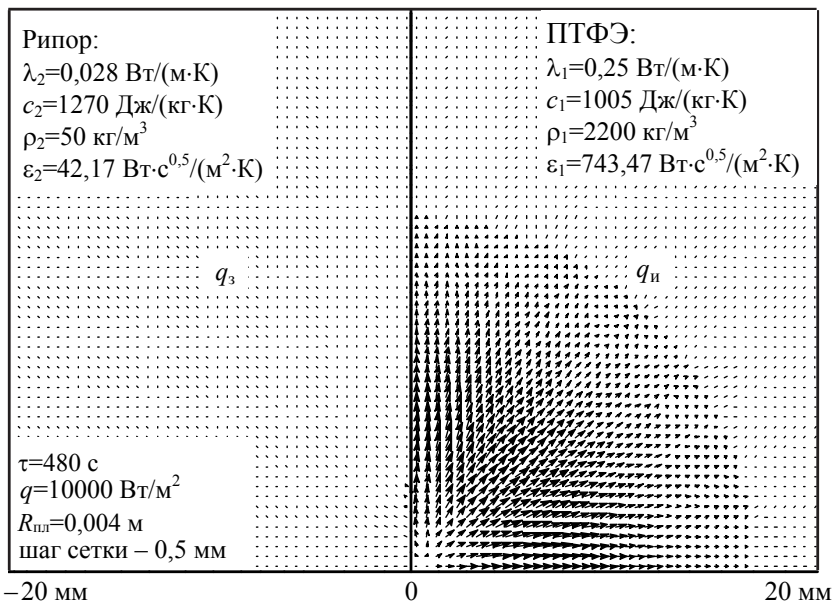


Рис. 10. Поле плотностей тепловых потоков от плоского нагревателя постоянной мощности в системе двух полуограниченных тел при идеальной теплоизоляции между ними на стадии остывания: q_3 , $q_и$ – поля плотностей тепловых потоков в материале подложки ИЗ и исследуемом изделии соответственно

Визуализации полей (см. рис. 9 и 10) свидетельствуют о реализации одномерного распространения тепла на стадии остывания от круглого плоского нагревателя в сферическом полупространстве согласно математической модели (1). Наблюдается идентичность температурных полей, создаваемых плоским круглым и модельным сферическим поверхностным нагревателями в температурно-временном интервале рабочего участка.

Таким образом, показана идентичность температурных полей от плоского круглого и модельного сферического поверхностного нагревателей в методе НК на рабочем участке термограммы при реализации стадии остывания. Адекватность математической модели (1) реальному теплопереносу при реализации метода НК ТФС на стадии остывания обеспечивает повышение точности и достоверности результатов измерений за счет использования рабочего (VII) участка термограммы, выделенного при своевременном окончании стадии нагрева.

Реализацию многомодельного метода неразрушающего определения ТФС материалов, как на стадии нагрева, так и на стадии остывания, осуществляют с помощью измерительных систем, детальное описание которых представлено в работах [8, 9].

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. Многомодельный метод неразрушающего определения теплофизических свойств твердых материалов / Н. П. Жуков [и др.] // Инженер.-физ. журн. – 2012. – Т. 85, № 1. – С. 188 – 194.
3. Оценка случайных погрешностей многомодельного метода неразрушающего определения теплофизических свойств твердых материалов / Н. П. Жуков [и др.] // Инженер.-физ. журн. – 2014. – Т. 87, № 6. – С. 1341 – 1348.
4. Оценка систематических погрешностей многомодельного метода неразрушающего определения теплофизических свойств твердых материалов / Н. П. Жуков [и др.] // Инженер.-физ. журн. – 2014. – Т. 87, № 4. – С. 853 – 859.
5. Жуков, Н. П. Моделирование теплопереноса в методе неразрушающего теплофизического контроля. Стадия остывания / Н. П. Жуков, Н. Ф. Майникова // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2015. – Т. 21, № 2. – С. 231 – 238.
6. Математическая модель распространения тепла в системе двух полуограниченных тел на стадии остывания / Н. П. Жуков [и др.] // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2015. – Т. 21, № 3. – С. 388 – 392.
7. ELCUT: Моделирование двумерных полей методом конечных элементов. Версия 5.1. Руководство пользователя / Производств. кооператив ТОР. – СПб. : Производств. кооператив ТОР, 2003. – 249 с.
8. Майникова, Н. Ф. Измерительная система и метод неразрушающего контроля структурных превращений в полимерных материалах / Н. Ф. Майникова // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2006. – № 1. – С. 56 – 61.
9. Жуков, Н. П. Измерительно-вычислительная система неразрушающего теплофизического контроля / Н. П. Жуков, Н. Ф. Майникова // Приборы и техника эксперимента. – 2005. – № 4. – С. 164 – 166.

Identity of Temperature Fields Produced by Flat and Spherical Heaters in the Method of Non-Destructive Thermal Testing

N. F. Mainikova, N. P. Zhukov

Department "Enterprise Power Supply and Thermal Engineering", TSTU;
teplotehnika@nnn.tstu.ru

Keywords: adequacy; cooling stage; half-spherical; mathematical model; non-destructive testing; temperature field; numerical calculation; thermal effect; thermal analysis; thermal properties.

Abstract: We used a multi-modal method for non-destructive testing of thermal properties of solid materials. The accuracy of the method in the cooling phase is improved through the timely completion of the heating phase. We proved the identity of temperature fields produced by flat circular and spherical surface heaters using the method of non-destructive testing in the cooling phase.

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. (In Russ.)
2. Zhukov N.P., Mainikova N.F., Rogov I.V., Pudovkina E.V. Multimodel method of nondestructive determination of the thermophysical properties of solid materials, *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2012, vol. 85, no. 1, pp. 203-209.
3. Zhukov N.P., Mainikova N.F., Rogov I.V., Antonov A.O. Evaluation of Random Errors of the Multimodel Method of Nondestructive Determination of the Thermophysical Properties of Solid Materials, *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2014, vol. 87, no. 6, pp. 1398-1406.
4. Zhukov N.P., Mainikova N.F., Rogov I.V., Antonov A.O. Estimation of Systematic Errors of the Multimodel Method for Nondestructive Determination of the Thermophysical Properties of Solid Materials, *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2014, vol. 87, no. 4, pp. 880-887.
5. Zhukov N.P., Mainikova N.F. [Heat Transfer Simulation in Non-Destructive Thermophysical Testing. The Stage of Cooling], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2015, vol. 21, no. 2, pp. 231-238. (In Russ., abstract in Eng.)
6. Zhukov N.P., Mainikova N.F., Rogov I.V., Nikulin S.S. [Mathematical Model of Heat Transfer in the System of Two Semibounded Bodies], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2015, vol. 21, no. 3, pp. 388-392. (In Russ., abstract in Eng.)
7. 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. (In Russ.)
8. Mainikova N.F. [Measuring system and non-destructive testing method controlling the structural changes in polymeric materials], *Pribory i sistemy*.

Upravlenie, kontrol', diagnostika [Instruments and Systems: Monitoring, Control, and Diagnostics], 2006, no. 1, pp. 56-61. (In Russ., abstract in Eng.)

9. Zhukov N.P., Mainikova N.F. [A measuring-computational system of nondestructive control of thermophysical properties], *Pribory i tekhnika eksperimenta* [Instruments and Experimental Techniques], 2005, no. 4, pp. 164-166. (In Russ.)

Identität der Temperaturfelder von den flachen und sphärischen Erhitzern in der Methode der nichtzerstörenden wärmephysikalischen Kontrolle

Zusammenfassung: Es ist die Mehrmodelmethode der nichtzerstörenden Bestimmung der wärmephysikalischen Eigenschaften der festen Materialien betrachtet. Die Erhöhung der Genauigkeit der Methode auf dem Stadium des Abkühlens wird infolge des termingemäßen Abschlusses des Stadiums der Erwärmung erreicht. Es ist die Identität der Temperaturfelder von den flachen runden und modelsphärischen oberflächlichen Erhitzern in der Methode der nichtzerstörenden Kontrolle bei der Realisierung des Stadiums des Abkühlens angeführt. Es ist die Identität der Temperaturfelder von den flachen und sphärischen Erhitzern in der Methode der nichtzerstörenden wärmephysikalischen der Kontrolle gezeigt.

Identité des champs de température à partir de l'appareil thermique plat et celui sphérique dans la méthode du contrôle thermophysique non destructive

Résumé: Est considérée la méthode à plusieurs modèles de la définition non destructive des propriétés thermophysiques des matériaux solides. L'augmentation de la précision de la méthode pendant la phase du refroidissement est obtenue grâce à la fin actuel de la phase du chauffage. Est montrée l'identité des champs de température à partir de l'appareil thermique rond plat et celui sphérique modéliste dans la méthode du contrôle thermophysique non destructive lors de la mise en œuvre de la phase du refroidissement.

Авторы: *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», ФГБОУ ВО «ТГТУ».

Рецензент: *Глинкин Евгений Иванович* – доктор технических наук, профессор кафедры «Биомедицинская техника», ФГБОУ ВО «ТГТУ».
