

АДАПТИВНЫЙ МЕТОД НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ И ИЗДЕЛИЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ ЭНЕРГИИ СВЧ-ИЗЛУЧЕНИЯ ДЛЯ НАГРЕВА ИССЛЕДУЕМЫХ ОБЪЕКТОВ

В. Н. Чернышов¹, А. П. Негуляева²,
С. П. Москвитин², А. В. Чернышов¹

*Кафедра «Уголовное право и прикладная информатика в юриспруденции» (1),
кафедра «Радиотехника» (2), ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия;
sergey.msk@mail.ru*

Ключевые слова: оперативность; СВЧ-излучение; температуропроводность; теплопроводность; тепловая активность.

Аннотация: Обоснована актуальность создания новых адаптивных микроволновых методов и реализующих их измерительных систем неразрушающего контроля теплофизических характеристик строительных материалов и изделий. Предложен микроволновый метод неразрушающего контроля теплофизических характеристик исследуемых объектов. Отличительной особенностью данного метода является адаптивный поиск в процессе эксперимента частоты тепловых импульсов от генератора СВЧ-излучения для быстрого вывода исследуемой системы в заданный тепловой режим.

Введение

Для решения проблемы энергосбережения в строительной теплотехнике необходимо иметь информацию о теплофизических свойствах как традиционных, так и вновь синтезируемых строительных материалов, то есть необходимо иметь достоверные сведения о теплопроводности, температуропроводности и теплоемкости используемых в строительстве материалов.

К сожалению, в современной отечественной и зарубежной строительной отрасли методов и средств контроля теплофизических характеристик (ТФХ) материалов и готовых изделий без нарушения их целостности эксплуатационных характеристик очень мало. Поэтому разработка новых методов и реализующих их устройств неразрушающего контроля (НК) ТФХ строительных материалов является неоспоримо важной задачей, позволяющей решить проблему энергосбережения в строительстве.

В последнее время стали появляться и находить широкое применение методы контроля ТФХ строительных материалов, основанные на применении энергии СВЧ-излучения для нагрева исследуемых объектов [1 – 6]. Это обусловлено тем, что такой вид теплового воздействия существенно повышает оперативность и точность методов и реализующих систем.

Цель работы: разработка нового бесконтактного СВЧ-метода неразрушающего контроля строительных материалов и изделий.

На поверхность исследуемого твердого строительного материала воздействуют импульсами СВЧ-излучения, сфокусированного в линию заданных размеров

линзой из радиопрозрачного диэлектрического материала, осуществляя нагрев исследуемого полуграниченного в тепловом отношении тела. При этом неподвергаемая тепловому воздействию поверхность исследуемого объекта теплоизолирована от окружающей среды. Исследования показали, что с повышением частоты СВЧ-нагрева, глубина проникновения электромагнитных волн уменьшается (рис. 1). Очевидно, что энергия СВЧ-излучения практически полностью выделяется на глубине не более 1...2 мм при частоте не менее 10 ГГц. В этом случае нагрев можно считать поверхностным для полуграниченных в тепловом отношении тел, которыми являются исследуемые объекты. Это подтверждается и теорией воздействия электромагнитных волн на диэлектрик [7].

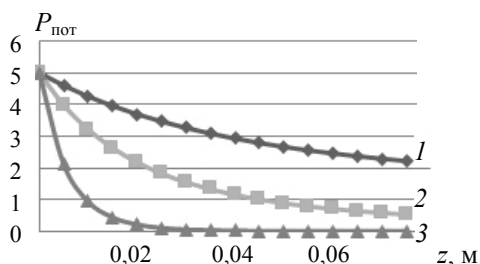


Рис. 1. Затухание электромагнитных волн различных частот в исследуемом объекте, ГГц: 1 – 3; 2 – 5; 3 – 10

Вначале на поверхность исследуемого твердого материала воздействуют одиночным импульсом длительностью 2...3 с от генератора СВЧ-излучения с частотой не менее 20 ГГц мощностью Q по линии заданных размеров (рис. 2, а), затем определяют интервал времени $\tau_{\text{имп1}}$ и $\tau_{\text{имп2}}$ от начала теплового воздействия до момента времени, когда температура соответственно в точках контроля x_1 и x_2 станет равной первоначальной температуре $T_0 \pm \varepsilon$, где ε – чувствительность измерительной аппаратуры. Затем определяют минимальную частоту подачи импульсов от СВЧ-генератора $F_{\text{min}} = \min\left\{\frac{1}{\tau_{\text{имп1}}}; \frac{1}{\tau_{\text{имп2}}}\right\}$, при которой не будет происходить роста избыточной температуры в точках контроля, если осуществлять воздействия тепловыми импульсами с этой частотой. Далее воздействуют на исследуемый объект импульсами СВЧ-излучения той же длительности, увеличивая частоту их подачи по закону:

$$F = F_{\text{min}} + \Delta F_i, \quad \Delta F_i = K_1 \Delta \tau_i + \frac{1}{K_2} \int_{\tau_{j-1}}^{\tau_j} \Delta T(\tau) d\tau + K_3 \frac{d}{d\tau} [\Delta T_i(\tau)] \Big|_{\tau = \tau_i}, \quad (1)$$

где $\Delta T(\tau) = T_{\text{зад1}} - T(\tau)$ – разность между наперед заданным значением и текущим значением контролируемой температуры; $\Delta T_i = T_{\text{зад}} - T(\tau)$ – разность между заданной и текущей температурой в момент времени, который определяется в соответствии с формулой:

$$\tau_i = K_4 \sum_{k=1}^{i-1} \Delta T_k + \tau_{\text{min}}, \quad (2)$$

где K_1, \dots, K_4 – коэффициенты пропорциональности, определяемые экспериментальным путем; τ_{min} – минимальный интервал времени определения разности ΔT_i . Увеличение частоты следования тепловых импульсов в соответствии с приведенным законом осуществляется до тех пор, пока установившееся значение избыточной температуры в точке контроля x_1 не достигнет наперед заданного значения $T_{\text{зад1}}$, величина которого задается ниже на 20 – 30 % температуры термодеструкции $T_{\text{терм}}$ исследованного материала, то есть $\Delta T = T_{\text{зад1}} - T(\tau) = 0$ (рис. 2, б).

Установившееся значение температуры в точке контроля достигается тогда, когда очередной тепловой импульс из серии импульсов, подаваемых источником, не изменяет температуру в этой точке. Определяют частоту тепловых импульсов F_{x1} , затем продолжают увеличение частоты следования импульсов по указанной выше зависимости до тех пор, пока установившееся значение избыточной температуры в точке контроля x_2 станет равным наперед заданному значению $T_{зад2}$, и находят соответствующую этому тепловому режиму частоту следования импульсов F_{x2} , а искомые ТФХ вычисляют по математическим зависимостям, полученным на основании следующих рассуждений.

Процесс распространения тепла на теплоизолированной от внешней среды поверхности полубесконечного в тепловом отношении тела при действии линейного источника тепла описывается решением задачи теплопроводности, которое имеет вид [8]

$$T(x, \tau - \tau_i) = \sum_{i=1}^n \frac{Q}{2\pi\lambda(\tau - \tau_i)} \exp\left[-\frac{x^2}{4a(\tau - \tau_i)}\right], \quad (3)$$

где x – расстояние от линейного источника тепла до точки контроля, м; τ – время, с; τ_i – момент нанесения i -го теплового импульса на поверхность тела.

При нанесении одного теплового импульса изменение температуры в точке контроля определяется соотношением

$$T(x, \tau) = \frac{Q}{2\pi\lambda\tau} \exp\left(-\frac{x^2}{4a\tau}\right). \quad (4)$$

Из уравнения (4) по заданной величине ε – чувствительности измерительной аппаратуры – из решения уравнения

$$\frac{Q}{\pi\lambda\tau} \exp\left(-\frac{x^2}{4a\tau}\right) = \varepsilon, \quad (5)$$

определяются интервалы времени релаксации температурного поля в точках x_1 и x_2 от воздействия теплового импульса: $\tau_{имп1}$, $\tau_{имп2}$.

Полученные интервалы $\tau_{имп}$ полностью определяют число импульсов, влияющих на установившуюся температуру в точке контроля. Число импульсов, подаваемых на интервале $\tau_{имп}$ с частотой F , определяется соотношением

$$n = E(\tau_{имп} F), \quad (6)$$

где $E(x)$ – функция целой части числа x .

Таким образом, для двух точек контроля x_1 и x_2 находятся интервалы времени импульсов $\tau_{имп1}$, $\tau_{имп2}$ из решения уравнения (5). Увеличивая по закону (1) частоту подачи импульсов, определяют частоты F_{x1} и F_{x2} ,

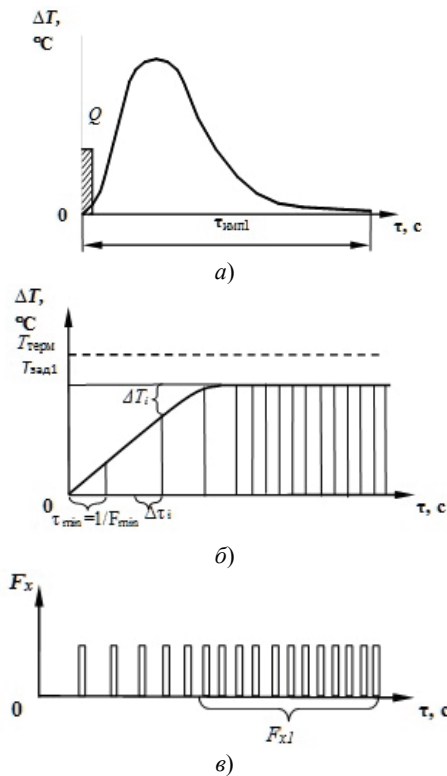


Рис. 2. Термограммы нагрева при адаптивном изменении частоты тепловых импульсов, воздействующих на исследуемый объект

при которых достигается установившееся заданное значение температуры $T_{\text{зад1}}$ в точках контроля x_1 и x_2 соответственно. Из соотношения (5) находят число импульсов n_1, n_2 , влияющих на температуру в точках контроля x_1 и x_2 :

$$n_1 = E(\tau_{\text{имп1}} F_{x1}) = E\left(\frac{F_{x1}}{F_{\text{имп1}}}\right); \quad (7)$$

$$n_2 = E(\tau_{\text{имп2}} F_{x2}) = E\left(\frac{F_{x2}}{F_{\text{имп2}}}\right), \quad (8)$$

где $F_{\text{имп}i} = \frac{1}{\tau_{\text{имп}i}}$ – минимальные частоты подачи импульсов для точек контроля.

Установившаяся температура в результате действия серии импульсов в точках контроля x_1 и x_2 на основании (3) будет определяться соотношением:

$$T_1 = \frac{Q}{2\pi\lambda\Delta\tau_1} \sum_{i=1}^{n_1} \frac{1}{i} \exp\left(-\frac{x_1^2}{4a\Delta\tau i}\right) = \frac{QF_{x1}}{2\pi\lambda} \sum_{i=1}^{n_1} \frac{1}{i} \exp\left(-\frac{x_1^2}{4a\Delta\tau i}\right); \quad (9)$$

$$T_2 = \frac{QF_{x2}}{2\pi\lambda} \sum_{i=1}^{n_2} \frac{1}{i} \exp\left(-\frac{x_2^2}{4a\Delta\tau i}\right), \quad (10)$$

где $\Delta\tau_i = (1/F_{xi})_{i=1,2}$ – расстояние между фронтами импульсов на интервалах $\tau_{\text{имп1}}$ и $\tau_{\text{имп2}}$.

Для решения системы (9) – (10) относительно a и λ воспользуемся разложением в ряд $e^x = \sum_{i=1}^{\infty} \frac{x^i}{i!}$ и ограничимся двумя слагаемыми:

$$T_{\text{зад1}} = \frac{QF_{x1}}{2\pi\lambda} \left(\sum_{i=1}^{n_1} \frac{1}{i} - \frac{x_1^2 F_{x1}}{4a} \sum_{i=1}^{n_1} \frac{1}{i^2} \right); \quad (11)$$

$$T_{\text{зад2}} = \frac{QF_{x2}}{2\pi\lambda} \left(\sum_{i=1}^{n_2} \frac{1}{i} - \frac{x_2^2 F_{x2}}{4a} \sum_{i=1}^{n_2} \frac{1}{i^2} \right). \quad (12)$$

Поделив (11) на (12), получим выражение для теплопроводности

$$a = \frac{(x_2 F_{x2})^2 \sum_{i=1}^{n_2} \frac{1}{i^2} - (x_1 F_{x1})^2 \sum_{i=1}^{n_1} \frac{1}{i^2}}{4 \left(F_{x2} \sum_{i=1}^{n_2} \frac{1}{i} - F_{x1} \sum_{i=1}^{n_1} \frac{1}{i} \right)}. \quad (13)$$

Для определения коэффициента теплопроводности найденное значение коэффициента подставляют в формулу (9)

$$\lambda = \frac{QF_{x1}}{2\pi T_{\text{зад1}}} \sum_{i=1}^{n_1} \frac{1}{i} \exp\left(-\frac{x_1^2 F_{x1}}{4ai}\right). \quad (14)$$

На рис. 3 представлена блок-схема измерительной системы, реализующая предложенный адаптивный метод неразрушающего контроля ТФХ строительных материалов. Расстояние от рупорной антенны 2 СВЧ-генератора 1 и параметры используемой диэлектрической радиопрозрачной линзы 3 подобраны с целью минимизировать рассеивание электромагнитных волн в окружающую среду и возможностью собрать фокусируемое излучение в линию 4 заданных размеров. Нагрев исследуемого материала 5 осуществляется импульсами высокочастотного электромагнитного поля (СВЧ-излучение) длительностью 2...3 с от излучающей антенны 2, соединенной волноводом с СВЧ-генератором 1. После воздействия импульсом высокочастотного электромагнитного поля проводят контроль избыточных температур на поверхности исследуемого объекта в двух точках, находящихся на расстоянии x_1 и x_2 от линии, где x_1 и x_2 от линии воздействия, величину которых задают соответственно 5 и 10 мм. Контроль температуры осуществляют бесконтактными инфракрасными термопреобразователями 6 и 7, сфокусированными в точке поверхности на расстоянии x_1 и x_2 от линии теплового воздействия, которые через коммутатор 8, нормирующий прецизионный усилитель 9 и аналогово-цифровой преобразователь 10, подключают к микропроцессору 11. Микропроцессор 11 соединен с СВЧ-генератором через порт ввода-вывода 12 и цифро-аналоговый преобразователь 13. Полученные данные эксперимента выводятся на индикатор 14.

Работа микропроцессорной измерительной системы происходит следующим образом.

По команде с микропроцессора 11 с СВЧ-генератора 1 подается один импульс, и по информации с термопреобразователей 6 и 7 в микропроцессоре 11 определяются интервалы времени $\tau_{\text{имп1}}$ и $\tau_{\text{имп2}}$. Затем воздействуют на исследуемый объект импульсами, увеличивая их частоту по алгоритму, построенному в соответствии с законом (1) – (2), до тех пор, пока установившееся значение избыточной температуры в точке контроля x_1 достигнет заданного значения $T_{\text{зад1}}$. Далее увеличивают частоту импульсов по тому же алгоритму до момента времени, когда контролируемая температура во второй точке x_2 достигнет заданного значения $T_{\text{зад2}}$, величина которого на 10 – 15 % отличается от $T_{\text{зад1}}$. Определяют затем частоты F_{x1} и F_{x2} и, используя информацию о мощности теплового импульса Q , рассчитывают искомое значение тепло- и температуропроводности исследуемых объектов. Найденные значения a и λ могут быть вызваны оператором на индикатор 14.

Экспериментальная проверка метода и реализующей его измерительной системы на наиболее известных строительных материалах (силикатный и красный кирпич, пенобетон и т.д.) показала работоспособность предложенного измерительного средства. Предложенный метод и измерительная система имеют следующие преимущества по сравнению с известными измерительными средствами данного назначения.

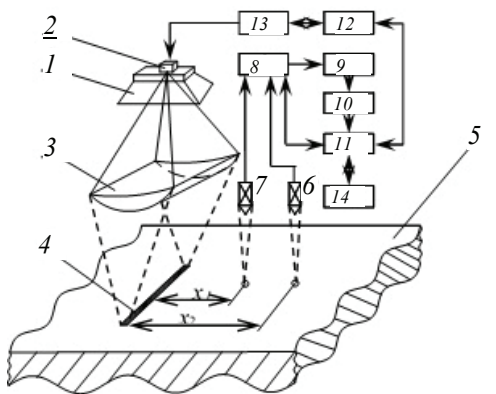


Рис. 3. Блок-схема микропроцессорной измерительной системы, реализующей микроволновый бесконтактный метод неразрушающего контроля ТФХ материалов

Осуществляется неразрушающий контроль ТФХ материалов, то есть без нарушения целостности исследуемого объекта и возможности его дальнейшей эксплуатации. Метод является бесконтактным, что позволяет получать информацию о контролируемых ТФХ без предварительной подготовки поверхности исследуемых объектов с большой оперативностью и точностью. Использование бесконтактного СВЧ-нагрева исследуемых объектов позволяет получить результаты, независимые от коэффициента степени черноты, шероховатости исследуемых объектов, что исключает дополнительную погрешность в полученных результатах.

Кроме того, нагрев происходит на поверхности исследуемого материала без применения каких-либо нагревательных элементов (в роли нагревателя выступает часть исследуемого материала), что позволяет исключить зависимость результатов от собственной теплоемкости нагревателя, искажающей температурное поле в исследуемых материалах, контактных термосопротивлениях между нагревателем и поверхностью исследуемого объекта, что, в итоге, повышает точность полученных результатов.

Заключение

Основным преимуществом предложенного метода и реализующей его системы по сравнению с известными являются нагрев исследуемых объектов без применения традиционных нагревательных элементов, так как роль нагревателя выполняет приповерхностный слой исследуемого материала в виде линии заданных размеров, что исключает погрешность от контактного термосопротивления между нагревателем и поверхностью исследуемого объекта, от влияния собственной теплоемкости металлического нагревателя на контролируемую термограмму нагрева и т.д. Адаптивное изменение в процессе теплофизического эксперимента мощности теплового воздействия позволяет вывести тепловую систему на заданный температурный режим, что обеспечивает высокую точность температурно-временных изменений с гарантией сохранения целостности и эксплуатационных характеристик исследуемых объектов.

В предложенном методе для осуществления приповерхностного нагрева исследуемых объектов по линии заданной длины и ширины частота СВЧ-излучения должна быть не ниже 20 ГГц.

Список литературы

1. Чернышов, В. Н. Методы и системы неразрушающего контроля теплозащитных свойств строительных материалов и изделий / В. Н. Чернышов, В. Г. Однотолко, А. В. Чернышов. – М. : Спектр, 2012. – 200 с.
2. Пат. № 2399911 Российская Федерация, МПК G 01 N 25/18. Способ определения теплофизических характеристик строительных материалов (варианты) / Чернышов В. Н., Голиков Д. О., Чернышов А. В. ; заявитель и патентообладатель Тамб. гос. техн ун-т. – № 2008145926/28 ; заявл. 20.11.2008 ; опубл. 20.09.2010, Бюл. № 26. – 10 с.
3. Чернышов, В. Н. СВЧ-метод и система оперативного контроля теплофизических характеристик строительных материалов / В. Н. Чернышов, А. В. Чернышов, Д. О. Голиков // Вести высших учебных заведений Черноземья. – 2010. – № 1. – С. 17 – 23.
4. Чернышова, Т. И. Методы и средства неразрушающего контроля теплофизических свойств материалов / Т. И. Чернышова, В. Н. Чернышов. – М. : Машиностроение, 2001. – 240 с.
5. Чернышова, Т. И. Методы и информационно-измерительные системы неразрушающего контроля теплофизических свойств материалов и изделий / Т. И. Чернышова, В. Н. Чернышов. – СПб. : Экспертные решения, 2016. – 384 с.

6. Жарикова, М. В. Энергоэффективный бесконтактный микроволновой метод неразрушающего контроля теплофизических характеристик строительных материалов и изделий / М. В. Жарикова, А. В. Чернышов, В. Н. Чернышов // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2015. Т. 21, № 3. – С. 399 – 405. doi: 10.17277/vestnik.2015.03.pp.399-405

7. Пюшнер, Г. Нагрев энергией СВЧ / Г. Пюшнер. – М. : Энергия, 1968. – 312 с.

8. Селиванова, З. М. Математические модели и алгоритм для совершенствования информационно-измерительной системы неразрушающего контроля теплофизических свойств материалов / З. М. Селиванов, Т. А. Хоан // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2016. – Т. 22, № 4. – С. 520 – 534. doi: 10.17277/vestnik.2016.04.pp.520-534

An Adaptive Method of Non-Destructive Testing of Thermophysical Properties of Materials and Products Using Microwave Radiation Energy for Heating of the Investigated Objects

V. N. Chernyshov¹, A. P. Negulyaeva², S. P. Moskvitin², A. V. Chernyshov¹

*Department of Criminal Law and Applied Informatics in Jurisprudence (1),
Department of Radio Engineering (2), TSTU, Tambov, Russia; sergey.msk@mail.ru*

Keywords: operational efficiency; microwave radiation; thermal diffusivity; thermal conductivity; thermal activity.

Abstract: The relevance of creating new adaptive microwave methods for non-destructive testing of thermophysical properties of building materials and products and measuring systems that realize them is substantiated. A microwave method for non-destructive testing of thermophysical properties of the investigated objects is proposed. An adaptive search for the frequency of thermal pulses from the microwave generator for the fastest possible output of the system under study to a given thermal regime during the experiment is a distinguishing feature of this method.

References

1. Chernyshov V.N., Odno!ko V.G., Chernyshov A.V. *Metody i sistemy nerazrushayushchego kontrolya teplozashchitnykh svoystv stroitel'nykh materialov i izdelii* [Methods and systems of non-destructive testing of heat-protective properties of building materials and products], Moscow: Spektr, 2012, 200 p. (In Russ.)

2. Chernyshov V.N., Golikov D.O., Chernyshov A.V. *Sposob opredeleniya teplofizicheskikh kharakteristik stroitel'nykh materialov (varianty)* [Method for determining the thermophysical characteristics of building materials (options)], Russian Federation, 2010, Pat. № 2399911. (In Russ.)

3. Chernyshov V.N., Chernyshov A.V., Golikov D.O. [Microwave method and system of operational control of thermophysical characteristics of building materials], *Vesti vysshikh uchebnykh zavedenii Chernozem'ya* [News of Higher Educational Institutions of the Chernozem Region], 2010, no. 1, pp. 17-23. (In Russ.)

4. Chernyshova T.I., Chernyshov V.N. *Metody i sredstva nerazrushayushchego kontrolya teplofizicheskikh svoystv materialov* [Methods and means of non-destructive testing of thermophysical properties of materials], Moscow: Mashinostroenie, 2001, 240 p. (In Russ.)

5. Chernyshova T.I., Chernyshov V.N. *Metody i informatsionno-izmeritel'nye sistemy nerazrushayushchego kontrolya teplofizicheskikh svoystv materialov i izdelii* [Methods and information-measuring systems for non-destructive testing of thermo-

physical properties of materials and products], St. Petersburg: Ekspertnye resheniya, 2016, 384 p. (In Russ.)

6. Zharikova M.V., Chernyshov A.V., Chernyshov V.N. [Energy-efficient non-contact microwave method of nondestructive testing of thermophysical characteristics of building materials and products], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2015, vol. 21, no. 3, pp. 399-405. doi: 10.17277/ vestnik.2015.03.pp.399-405 (In Russ., abstract in Eng.)

7. Pyushner G. *Nagrev energiei SVCh* [Heating by microwave energy], Moscow: Energiya, 1968, 312 p. (In Russ.)

8. Selivanova Z.M., Khoan T.A. [Mathematical models and algorithm for improving the information-measuring system for nondestructive testing of thermophysical properties of materials], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2016, vol. 22, no. 4, pp. 520-534. doi: 10.17277/vestnik.2016.04. pp. 520-534. (In Russ., abstract in Eng.)

Adaptive Methode der zerstörungsfreien Kontrolle der thermischen Eigenschaften von Materialien und Produkten mit der Verwendung der Mikrowellenstrahlung zur Erwärmung der zu untersuchenden Objekte

Zusammenfassung: Es ist die Relevanz der Schaffung neuer anpassungsfähiger Mikrowellenmethoden und der sie realisierenden Messsysteme der zerstörungsfreien Prüfung der thermischen Eigenschaften der Baustoffe und Erzeugnisse begründet. Es wird die Mikrowellenmethode der zerstörungsfreien Kontrolle der thermischen Eigenschaften von Materialien und Produkten der zu untersuchenden Objekte vorgeschlagen. Eine Besonderheit dieser Methode ist die adaptive Suche im Prozess des Experiments nach der Frequenz der thermischen Impulse vom Mikrowellenstrahlungsgenerator für die schnellste Ausführung des Untersuchungssystems in einen bestimmten thermischen Zustand.

Méthode adaptative du contrôle non destructif des propriétés thermophysiques des matériaux et des produits avec l'emploi de l'énergie du rayonnement micro-ondes pour le chauffage des objets étudiés

Résumé: Est justifiée l'actualité de la création de nouvelles méthodes adaptatives à micro-ondes pour des systèmes de mesure du contrôle non destructive des caractéristiques thermophysiques des matériaux de construction et des produits qui les réalisent. Est proposée une méthode à micro-ondes du contrôle non destructif des objets étudiés. La particularité de cette méthode est la recherche adaptative au cours de l'expérience de la fréquence des impulsions thermiques à partir du générateur de rayonnement micro-ondes pour la plus rapide sortie du système étudié dans un régime thermique.

Авторы: *Чернышов Владимир Николаевич* – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Уголовное право и прикладная информатика в юриспруденции»; *Негуляева Анастасия Петровна* – аспирант кафедры «Радиотехника»; *Москвитин Сергей Петрович* – кандидат технических наук, доцент кафедры «Радиотехника»; *Чернышов Алексей Владимирович* – кандидат технических наук, доцент кафедры «Уголовное право и прикладная информатика в юриспруденции», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.

Рецензент: *Данилов Станислав Николаевич* – доктор технических наук, профессор кафедры «Радиотехника», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.