

**ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА
НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ
СВОЙСТВ ТРЕХСЛОЙНЫХ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ**

А. П. Удалова¹, В. Н. Чернышов², Г. В. Шишкина³

*Кафедры: «Радиотехника» (1), udalova.tmb@yandex.ru;
«Уголовное право и прикладная информатика в юриспруденции» (2),
«Мехатроника и технологические измерения» (3),
ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Россия*

Ключевые слова: информационно-измерительная система; неразрушающий контроль; СВЧ-нагрев; температуропроводность; теплопроводность; теплофизические свойства материалов.

Аннотация: Представлена информационно-измерительная система (ИИС), позволяющая с необходимой для технологических измерений точностью осуществлять неразрушающий контроль теплофизических свойств (ТФС) трехслойных строительных конструкций. Отличительной особенностью предложенной ИИС является прогрев исследуемых материалов на заданную глубину, за счет чего тепловому воздействию подвергается большой объем исследуемых композитных строительных материалов, являющихся, как правило, гетерогенными и неоднородными, что необходимо для более точного определения их ТФС. Для осуществления нагрева исследуемых объектов энергией СВЧ-излучения в предложенной ИИС используются рупорно-линзовые антенны, параметры которых рассчитаны для формирования необходимого режима нагрева, вида и формы теплового воздействия.

Введение

В настоящее время остро стоит задача рационального использования топливно-энергетических ресурсов, для решения которой в строительной отрасли находят применение вновь синтезируемые теплоизоляционные материалы, обладающие более низкими коэффициентами тепло- и температуропроводности. Для контроля значений данных показателей, как в процессе производства, так и на стадии эксплуатации готовых изделий, необходимо применение информационно-измерительной системы (ИИС) неразрушающего контроля (НК) теплофизических свойств (ТФС) строительных материалов и готовых конструкций. Однако

систем, позволяющих без нарушения целостности исследуемых объектов с необходимой для строительной теплотехники точностью определять теплозащитные свойства материалов и готовых конструкций, достаточно мало. Тем не менее наиболее перспективными среди них являются ИИС, использующие электромагнитную энергию СВЧ-диапазона для осуществления нагрева исследуемых объектов [1 – 4]. Такой вид источника теплового воздействия позволяет существенно повысить точность измерений и сохранить целостность и эксплуатационные характеристики исследуемых строительных объектов.

Цель работы – создание ИИС, позволяющих с необходимой для технологических измерений точностью осуществлять НК ТФС трехслойных строительных конструкций.

Материалы и методы

Рассмотрим ИИС, реализующую метод неразрушающего контроля ТФС трехслойных строительных конструкций [5], в котором при определении ТФС наружных слоев рассчитывают частоту СВЧ-излучения, необходимую для прогрева $2/3$ толщины исследуемого слоя, что не допускает влияния ТФС внутреннего слоя на результаты измерений и позволяет прогреть большой объем исследуемого материала для получения среднеинтегральных по объему значений искомым ТФС. Осуществление теплового воздействия под заданным углом θ' к поверхности исследуемого наружного слоя позволяет учесть двумерность теплового потока, что повышает точность измерений, а учет тепловых потерь в окружающую среду, возникающих вследствие отражения части энергии от поверхности исследуемого объекта, позволяет повысить точность измерений. При определении ТФС внутреннего слоя нагрев осуществляется через круговую область на поверхности исследуемой конструкции СВЧ-излучением с частотой, рассчитанной на прогрев 4...5 мм наружного слоя исследуемой конструкции. При этом приповерхностный слой исследуемой конструкции выполняет роль нагревателя, что исключает влияние на результаты измерений контактного термосопротивления между поверхностью традиционного нагревателя и исследуемого объекта, которое зависит от степени прижатия нагревателя к поверхности, шероховатости поверхности, что также повышает достоверность определения искомым ТФС.

Одним из основных блоков ИИС при определении ТФС наружных слоев является рупорно-линзовая антенна, которая позволяет получить максимально узкую диаграмму направленности, обеспечивающую линию теплового воздействия длиной 0,08...0,1 м. Для получения такой диаграммы направленности проведен расчет параметров линзы и облучателя.

Если поместить в фокусе линзы источник сферической волны, то расходящийся пучок лучей при прохождении сквозь толщу линзы при правильном подборе формы ее профиля вследствие последовательных преломлений трансформируется в семейство параллельных лучей, образуя плоский фронт.

Фазовая скорость волны в линзе зависит от ее коэффициента преломления n . Если $n > 1$, то линза называется замедляющей (рис. 1, *a*), если $n < 1$ – ускоряющей (рис. 1, *б*). Замедляющие линзы выполняются из диэлектрика, а ускоряющие – из параллельных металлических пластин. Существенным недостатком линз из металлических пластин, по сравнению с диэлектрическими, являются ограниченность диапазона использования. Поэтому для реализации предложенного метода выбрана замедляющая линза, а в качестве материала диэлектрика – фторопласт. Кроме того, преимуществами диэлектрических линз являются некритичность

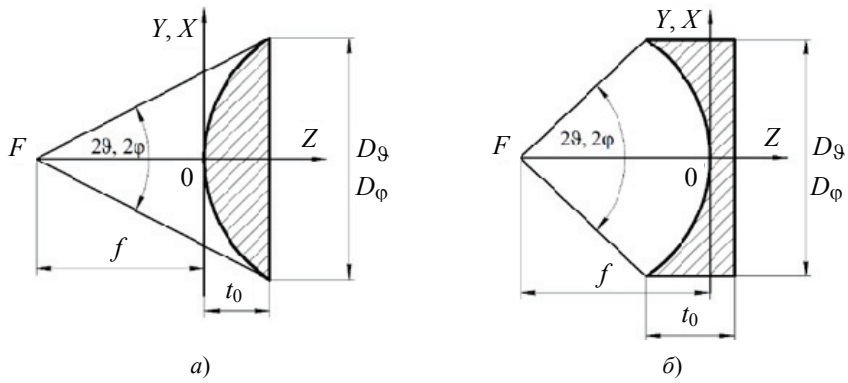


Рис. 1. Линзовые антенны:
a – замедляющая; *б* – ускоряющая

к поляризации поля (они фокусируют волну любой поляризации) и широкодиапазонность, обусловленная слабой зависимостью коэффициента преломления диэлектрика от частоты.

Для расчета параметров диэлектрической линзы воспользуемся методикой, представленной в работе [6].

В соответствии со справочными данными, касающимися геометрических и электрических параметров волноводов прямоугольного сечения, стандартизованных Международной электротехнической комиссией (МЭК), представленными в [7], выбран волновод типа МЭК-180.

Геометрические размеры излучающего раскрыва линзы D_θ и D_ϕ в главных плоскостях определяются соотношениями:

$$D_\theta = \frac{\lambda A^*}{2\theta_{p/2}}; \quad D_\phi = \frac{\lambda A^*}{2\phi_{p/2}}, \quad (1)$$

где λ – длина волны; A^* – коэффициент, учитывающий закон распределения амплитуды поля на излучающем раскрыве в соответствующей плоскости, выбирается в соответствии с данными, представленными в [8, 9]; $\theta_{p/2}$, $\phi_{p/2}$ – ширина диаграммы направленности в главных ортогональных плоскостях.

Коэффициент преломления n замедляющей диэлектрической линзы находится в соответствии с соотношением

$$n = \sqrt{\varepsilon} > 1, \quad (2)$$

где ε – относительная диэлектрическая проницаемость материала, из которого изготовлена замедляющая линза. Для фторопласта относительная диэлектрическая проницаемость $\varepsilon = 2$ Ф/м. Следовательно, коэффициент преломления $n = 1,4$.

Фокусное расстояние f и толщина замедляющей линзы t_0 определяются соответственно по формулам:

$$f = \frac{\sqrt{D_\theta^2 + D_\phi^2}}{2} \sqrt{\frac{n+1}{n-1}}; \quad (3)$$

$$t_0 = -\frac{f}{n+1} + \sqrt{\left(\frac{f}{n+1}\right)^2 + \frac{D_g^2 + D_\phi^2}{4(n^2 - 1)}}. \quad (4)$$

Таким образом, необходимая для реализации ИИС диэлектрическая линза имеет следующие параметры:

- геометрические размеры линзы: $D_g = 0,021$ м; $D_\phi = 0,812$ м;
- фокусное расстояние $f = 0,98$ м;
- толщина линзы $t_0 = 0,168$ м.

В качестве облучателя линзовой антенны выбран пирамидальный рупор. Размеры раскрыва рупора a_p и b_p определяется по формулам

$$2\vartheta_{p/2} = \frac{78^\circ \lambda}{a_p}; \quad 2\varphi_{p/2} = \frac{56^\circ \lambda}{b_p}. \quad (5)$$

Из (5) находим, что размеры раскрыва рупора a_p и b_p равны соответственно 0,026 м и 0,73 м.

Для определения ТФС внутреннего слоя необходимо определить параметры рупорно-линзовой антенны, фокусирующей СВЧ-излучение в область в виде круга диаметром 0,1 м. Для создания рупорно-линзовой антенны выбран материал диэлектрика линзы фторопласт и облучатель в виде конического рупора. Расчет параметров данной антенны осуществлялся также по методике, представленной в [6]. Из справочника [7] выбран тип волновода МЭК-900.

Требуется сформировать осесимметричную диаграмму направленности, то есть ширина диаграммы направленности в главных ортогональных плоскостях будет одинакова: $2\vartheta_{p/2} = 2\varphi_{p/2}$. Соответственно, геометрические размеры излучающего раскрыва линзы D_g и D_ϕ в главных плоскостях, определяющиеся соотношениями (1), будут равны. Коэффициент A^* выбирается из [8, 9].

Фокусное расстояние для замедляющей диэлектрической линзы выбираем в соответствии с формулой

$$f = R \sqrt{\frac{n+1}{n-1}}, \quad (6)$$

где R – радиус линзы.

Толщина замедляющей линзы определяется по формуле

$$t_0 = -\frac{f}{n+1} + \sqrt{\left(\frac{f}{n+1}\right)^2 + \frac{R^2}{n^2 - 1}}. \quad (7)$$

Таким образом, необходимая диэлектрическая линза имеет следующие параметры:

- геометрические размеры линзы: $D_g = D_\phi = 0,022$ м;
- фокусное расстояние $f = 0,027$ м;
- толщина линзы $t_0 = 4,591 \cdot 10^{-3}$ м.

В качестве облучателя выбран конический рупор, размер раскрыва которого находится из формулы

$$2\vartheta_{p/2} = \frac{60^\circ \lambda}{2a_p}. \quad (8)$$

Таким образом, размер раскрыва рупора составляет 0,039 м. Длина рупора берется примерно равной фокусному расстоянию линзы. Линза устанавливается в раскрыв рупора. Расстояние между поверхностью исследуемого объекта и раскрывом линзы составляет 0,5 м.

Результаты и обсуждение

Алгоритм работы ИИС НК ТФС трехслойных строительных конструкций заключается в следующем. После ввода исходных данных: мощности генератора Q ; расстояния от линии теплового воздействия до точек контроля значений избыточной температуры x_1, x_2 ; времени осуществления теплового воздействия τ^* ; толщин первого, второго и третьего слоев соответственно R_1, R_2, R_3 исследуемой строительной конструкции; величины абсолютной магнитной проницаемости μ_0 ; относительной магнитной проницаемости μ и диэлектрической проводимости γ материала верхнего слоя исследуемой конструкции, компьютер рассчитывает необходимую для прогрева $2/3$ толщины исследуемого наружного слоя частоту СВЧ-излучения и угол наклона θ' рупорной линзовой антенны к поверхности исследуемого объекта. По команде компьютера через порт ввода-вывода генератор СВЧ-излучения осуществляет тепловое воздействие под углом θ' с найденной частотой СВЧ-излучения. В заданный момент времени τ^* по команде компьютера бесконтактные первичные измерительные преобразователи температуры осуществляют контроль значений избыточных температур в двух точках, расположенных на заданных расстояниях x_1 и x_2 от линии теплового воздействия, и через порт ввода-вывода информация о полученных значениях поступает в компьютер, где происходит расчет искомого ТФС наружного слоя.

После определения ТФС двух наружных слоев исследуемой конструкции определяют ТФС внутреннего слоя. Для этого тепловое воздействие осуществляют через круговую область. Компьютер рассчитывает необходимую частоту микроволнового воздействия, при которой глубина проникновения электромагнитной волны составляет 2...3 мм. Затем информация о найденной частоте подается на СВЧ-генератор. После начала теплового воздействия при передаче на компьютер информации о величине теплового потока и температурах на обеих наружных поверхностях в зоне теплового воздействия с первичных измерительных преобразователей температуры, величине температуры окружающей среды с цифрового термометра по известным соотношениям определяют искомые ТФС внутреннего слоя, информация о которых выводится на монитор компьютера.

Преимуществом заявленной системы является нагрев электромагнитной энергией СВЧ-диапазона, исключая влияние собственной теплоемкости нагревателя, контактное термосопротивление между нагревателем и исследуемым объектом, степень прижатия нагревателя к объекту и шероховатость поверхности, что повышает ее точность. Кроме того, исключена возможность прогрева наружного слоя насквозь за счет прогрева исследуемого слоя на необходимую заранее рассчитанную глубину, таким образом, в нахождении ТФС наружных слоев не будут принимать участия ТФС внутреннего слоя, что также повышает точность предложенного метода.

На рисунке 2 представлена блок-схема, поясняющая работу ИИС, реализующей микроволновый метод неразрушающего контроля ТФС трехслойных строительных конструкций.

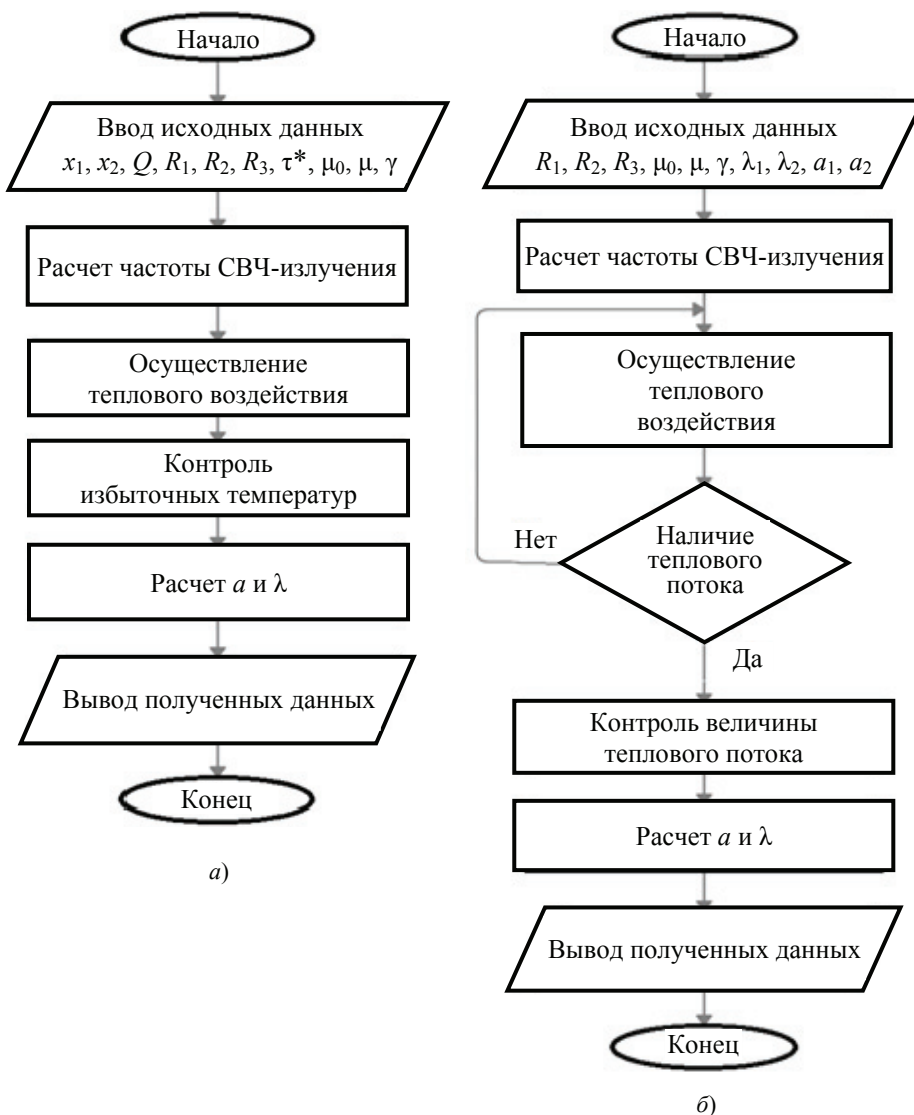


Рис. 2. Блок-схема работы ИИС НК ТФС трехслойных строительных конструкций

Заключение

Разработана ИИС, которая позволяет определять ТФС трехслойных строительных конструкций без нарушения их целостности и эксплуатационных характеристик. При определении ТФС наружных слоев система в автоматическом режиме рассчитывает частоту СВЧ-излучения, необходимую для прогрева исследуемого наружного слоя на заданную глубину, что исключает влияние на результаты измерений ТФС внутреннего слоя. Кроме того, система автоматически рассчитывает и устанавливает угол наклона антенны θ' к поверхности исследуемого объекта, осуществляет алгоритмическую коррекцию результатов измерений с учетом тепловых потерь в окружающую среду, возникающих за счет отражения части микроволнового излучения с поверхности исследуемого объекта, определяя

угол Брюстера, что повышает точность конечных результатов измерений. При определении ТФС внутреннего слоя тепловое воздействие осуществляется через круговую область, при этом система автоматически рассчитывает частоту СВЧ-излучения, при которой тепловому воздействию подвергается приповерхностный слой исследуемой строительной конструкции, выполняя роль нагревателя, исключая влияние состояния поверхности исследуемого объекта, контактного термосопротивления между нагревателем и поверхностью исследуемого объекта, собственной теплоемкости нагревателя и т.д. на результаты определения искомого ТФС, что повышает точность измерений. При разработке ИИС проведены расчеты основных параметров рупорно-линзовых антенн, позволяющих создать требуемый для разработанных методов вид теплового микроволнового воздействия за счет формирования соответствующих диаграмм направленности. Сконструированные на основе проведенного расчета рупорно-линзовые антенны являются основными и наиболее важными блоками в разработанной ИИС.

Представленная ИИС НК ТФС трехслойных строительных конструкций позволит расширить перечень исследуемых объектов и найдет применение в строительной теплотехнике при определении теплозащитных свойств зданий и сооружений.

Список литературы

1. Жарикова, М. В. Бесконтактные микроволновые методы и реализующие их системы неразрушающего контроля теплофизических характеристик строительных материалов и изделий : дис. ... канд. техн. наук : 05.11.13 / Жарикова Мария Валерьевна. – Тамбов, 2016. – 134 с.

2. Голиков, Д. О. Микроволновые методы и реализующие их системы контроля теплофизических характеристик строительных материалов и изделий : дис. ... канд. техн. наук : 05.11.13 / Голиков Дмитрий Олегович. – Тамбов, 2013. – 179 с.

3. Адаптивный метод неразрушающего контроля теплофизических свойств материалов и изделий с применением энергии СВЧ-излучения для нагрева исследуемых объектов / В. Н. Чернышов, А. П. Негуляева, С. П. Москвитин, А. В. Чернышов // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2018. – Т. 24, № 1. – С. 16 – 23. doi: 10.17277/vestnik.2018.01.pp.016-023

4. Жарикова, М. В. Энергоэффективный бесконтактный микроволновый 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

5. Пат. 2744606 Российская Федерация, МПК G01N 25/18. Микроволновый способ определения теплофизических характеристик многослойных конструкций и изделий / С. А. Мордасов, А. П. Негуляева, В. Н. Чернышов ; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «ТГТУ». – № 2020124454 ; заявл. 23.07.2020 ; опубл. 11.03.2021, Бюл. № 8 – 18 с.

6. Дорохов, А. П. Расчет и конструирование антенно-фидерных устройств / А. П. Дорохов. – Харьков : Изд-во Харьковского ун-та, 1960. – 450 с.

7. Фельдштейн, А. Л. Справочник по элементам волноводной техники / А. Л. Фельдштейн, Л. Р. Ярвич, В. П. Смирнов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Сов. радио, 1967. – 651 с.

8. Никитин, Б. Т. Антенны и устройства сверхвысоких частот. Расчет и проектирование устройств СВЧ : учеб. пособие / Б. Т. Никитин, Л. А. Федорова, Ю. Н. Данилов. – Л. : ЛИАП, 1986. – 66 с.

9. Кюн, Р. Микроволновые антенны : пер с нем. / Р. Кюн ; под ред. М. П. Долюханова. – Л. : Судостроение, 1967. – 518 с.

Information-Measuring System for Non-Destructive Testing of Thermophysical Properties of Three-Layer Building Structures

A. P. Udalova¹, V. N. Chernyshov², G. V. Shishkina³

*Departments of Radio Engineering (1), udalova.tmb@yandex.ru,
Criminal Law and Applied Informatics in Jurisprudence (2),
Mechatronics and Technological Measurements (3),
TSTU, Tambov, Russia*

Keywords: information-measuring system; non-destructive testing; microwave heating; thermal diffusivity; thermal conductivity; thermal-physical properties of materials.

Abstract: The paper describes an information-measuring system (IMS) that enables to carry out non-destructive testing of thermophysical properties (TPPs) of three-layer building structures with the accuracy necessary for technological measurements. A distinctive feature of the proposed IMS is the heating of the studied materials to a given depth, due to which a large volume of the investigated composite building materials, which are usually heterogeneous and inhomogeneous, are subjected to thermal action, which is necessary for a more accurate determination of their TPPs. To heat the objects under study with microwave energy, the proposed IMS uses horn-lens antennas, the parameters of which are calculated to form the required heating mode, type and form of thermal exposure.

References

1. Zharikova M.V. *PhD Dissertation (Technical)*, Tambov, 2016, 134 p. (In Russ.)
2. Golikov D.O. *PhD Dissertation (Technical)*, Tambov, 2013, 179 p. (In Russ.)
3. Chernyshov V.N., Negulyaeva A.P., Moskvitin S.P., Chernyshov A.V. [Adaptive method for non-destructive testing of thermophysical properties of materials and products using microwave energy for heating the objects under study], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2018, vol. 24, no. 1, pp. 16-23, doi: 10.17277/vestnik.2018.01.pp.016-023 (In Russ., abstract in Eng.)
4. Zharikova M.V., Chernyshov A.V., Chernyshov V.N. [Energy-efficient non-contact microwave method of non-destructive control of the 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.)
5. Mordasov S.A., Negulyaeva A.P., Chernyshov V.N. *Mikrovolnovyy sposob opredeleniya teplofizicheskikh kharakteristik mnogosloynnykh konstruksiy i izdeliy* [Microwave method for determining the thermophysical characteristics of multilayer structures and products], Russian Federation, 2021, Pat. 2744606. (In Russ.)
6. Dorohov A.P. *Raschet i konstruirovaniye antenno-fidernykh ustroystv* [Calculation and design of antenna-feeder devices], Kharkov: Izdatel'stvo Har'kovskogo un-ta, 1960, 450 p. (In Russ.)
7. Fel'dshtejn A.L., Yarvich L.R., Smirnov V.P. *Spravochnik po elementam volnovodnoy tekhniki* [Handbook of elements of waveguide technology], Moscow: Sovetskoe radio, 1967, 651 p. (In Russ.)
8. Nikitin B. T., Fedorova L. A., Danilov Yu.N. *Antenny i ustroystva sverkhvysokikh chastot. Raschet i proyektirovaniye ustroystv SVCH : uchebnoye posobiye* [Antennas and microwave frequency devices. Calculation and design of microwave devices: textbook], Leningrad, 1986, 66 p. (In Russ.)

**Informations- und Messsystem zur zerstörungsfreien Kontrolle
der thermischen physikalischen Eigenschaften
von dreischichtigen Baukonstruktionen**

Zusammenfassung: Es ist ein Informations- und Messsystem (IMS) vorgestellt, das es ermöglicht, mit der für technologische Messungen erforderlichen Genauigkeit zerstörungsfreie Prüfungen thermophysikalischer Eigenschaften (TPS) von dreischichtigen Baustrukturen durchzuführen. Eine Besonderheit des vorgeschlagenen IMS ist die Erwärmung der untersuchten Materialien bis zu einer bestimmten Tiefe, wodurch ein großes Volumen der untersuchten Verbundbaustoffe, die normalerweise heterogen und inhomogen sind, einer thermischen Einwirkung ausgesetzt werden, was für die genauere Bestimmung ihrer TFS notwendig ist. Um die untersuchten Objekte mit Mikrowellenenergie zu erwärmen, verwendet das vorgeschlagene IMS Hornlinsenantennen, deren Parameter berechnet werden, um den erforderlichen Erwärmungsmodus, die Art und Form der thermischen Einwirkung zu bilden.

**Système d'information et de mesure pour le contrôle non destructif
des propriétés thermiques des structures de construction à trois couches**

Résumé: Est présenté le système d'information et de mesure (SIM) qui permet d'effectuer avec précision le contrôle non destructif des propriétés thermiques et physiques (PTP) des structures de construction à trois couches. La caractéristique distinctive de SIM proposé est le réchauffement des matériaux étudiés à une profondeur donnée. Un grand nombre de matériaux de construction composites étudiés sont exposés à la chaleur. Ce sont en general les matériaux hétérogènes ce qui est nécessaire pour une détermination plus précise de leur PTP. Pour chauffer les objets étudiés avec l'énergie du rayonnement micro-ondes dans le SIM proposé, sont utilisées des antennes à lentilles cornéennes dont les paramètres sont calculés pour former le mode de chauffage nécessaire, ainsi que le type et la forme de l'effet thermique.

Авторы: *Удалова Анастасия Петровна* – ассистент кафедры «Радиотехника»; *Чернышов Владимир Николаевич* – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Уголовное право и прикладная информатика в юриспруденции»; *Шишкина Галина Викторовна* – кандидат технических наук, доцент кафедры «Мехатроника и технологические измерения», ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Россия.