

**УПРАВЛІННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИМИ ПРОЦЕСАМИ**

УДК 581.341

С.В. Иносов, Т.Ю. Пристайло, В.С. Шикалов

*Киевский национальный университет строительства и архитектуры, Киев***ИДЕНТИФИКАЦИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК  
МАГНИТОСТРИКЦИОННОГО ДАТЧИКА УДЕЛЬНОГО  
ТЕПЛОСОПРОТИВЛЕНИЯ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ**

*Предлагается метод измерения удельного теплосопротивления твердых материалов линейным проволочным нагревателем (он же измеритель температуры), помещенным между двумя плоскими пластинами из исследуемого материала. Излагаются результаты исследования предлагаемой схемы измерения. Приводится компьютерная модель метода и экспериментальные результаты с целью обоснования ее преимуществ.*

**Ключевые слова:** *строительные материалы, удельное теплосопротивление, теплопроводность, измерение, линейный нагреватель, магнитострикционный датчик*

*Пропонується при вимірюваннях питомого теплоопору лінійний дротовий нагрівач (він же вимірювач температури) розміщувати між двома пластинами з досліджуваного матеріалу. Викладаються результати дослідження запропонованої схеми вимірювання на комп'ютерній моделі і експериментально з метою обґрунтування її переваг.*

**Ключові слова:** *будівельні матеріали, питомий теплоопор, теплопровідність, вимірювання, лінійний нагрівач, магнітострикційні датчик*

*It is proposed, when measuring specific heat resistance of a constructive material, to position linear wire heater (it also temperature sensor) between two plates of the material being measured. The results of computer simulation and experimental research of the proposed measuring scheme are reported with the purpose of demonstration of its benefits.*

**Keywords:** *construction materials, specific теплосопротивление, thermal conductivity, measuring, linear heater, magnetostrictive transducer*

**Постановка проблемы**

Известны способы измерения удельного теплосопротивления (теплопроводности) строительных материалов с линейным нагревателем в качестве источника тепла [1; 2; 4;].

Нагревателем является металлическая проволока, через которую пропускается постоянный электрический ток. Конструкция помещена во внешний металлический полый каркас (зонд). Существует большое количество зондовых методов, которые отличаются друг от друга геометрией зонда, тепловым режимом работы и вариантами размещения нагревателя и измерителя температуры.

Тепловой контакт обеспечивается заполнением внутреннего объема зонда теплопроводящей

жидкостью (масло, термопаста). Температура измеряется датчиком температуры, как правило это термомпара, либо по изменению электрического сопротивления проволоки. Теплопроводность образца вычисляется по динамическим характеристикам процесса нагрева.

Однако, такая схема измерений не является преобладающей, так как связана с рядом нерешенных практических проблем и источников погрешностей.

**Анализ последних исследований  
и публикаций**

В известных измерителях теплопроводности создается цилиндрическое тепловое поле в исследуемом образце (рис. 1), когда тепловой поток распространяется от нагревателя радиально, а

изотермы образуют цилиндрические поверхности [4]. Габариты образца должны на два порядка превышать диаметр нагревателя для обеспечения достаточной точности измерения. Такой вариант имеет следующие недостатки:

1. Практически затруднительно обеспечить идеальный тепловой контакт с образцом по всей поверхности нагревателя, особенно при оперативных измерениях и вне лаборатории. Относительно небольшие воздушные промежутки прерывают тепловой поток. Использование теплопроводящих смазок искажает результаты измерения. В твердых материалах (например, стекло) создание отверстия для зонда крайне затруднительно.

2. На динамику нагрева влияет не только теплосоппротивление, но и объемная теплоемкость исследуемого материала. При измерении теплопроводности новых материалов их теплоемкость априори неизвестна. Исключить влияние теплоемкости исследуемых образцов при измерении теплопроводности не представляется возможным.

3. Требуется относительно длительное время для достижения режима установившегося теплового поля. При измерении разности температур за время  $\Delta t$  нагрева исследуемого образца до достижения стационарного температурного режима в результате измерений вносятся существенные погрешности, корректировка которых входит в формулы расчета искомой теплопроводности для существующих методов [1; 4].

### Цель исследования

Предлагается при измерениях использовать схему распространения теплового потока, представленную на рис. 2. Нагреватель помещается между двумя пластинами исследуемого материала. Тепловой контакт обеспечивается только по двум линиям касания вдоль нагревателя. Такая схема нагрева имеет целый ряд преимуществ перед классическим вариантом рис. 1. Единственный очевидный источник погрешности – нестабильность зоны теплового контакта – оказался несущественным. Ниже излагаются результаты исследования предлагаемой схемы измерения с помощью компьютерной модели и экспериментально с целью обоснования ее преимуществ.

### Изложение основного материала

На рис. 3 приведена схема экспериментальной установки для определения удельного теплосоппротивления строительных материалов. В качестве звукопровода и нагревателя использована никелевая проволока диаметром 0.2 мм и длиной

200мм. Проволока нагревается стабилизированным электрическим постоянным током 400, 500 или 600 мА. Электрическое сопротивление нагревателя около 1 Ом при 20° С (температурный коэффициент сопротивления 0.7 %/град для никеля). Катушка возбуждения преобразует возбуждающий электрический импульс в звуковую волну за счет магнитострикционного взаимодействия [3] никеля с электромагнитным полем катушки. Приемная катушка осуществляет обратное преобразование. Время распространения звуковой волны (время задержки между возбуждающим и приемным импульсом) около 50 мкс. Температура измеряется по изменению времени задержки ультразвуковой волны. Это изменение незначительно (0.01% на градус), поэтому требования к точности измерения времени весьма высоки. Допустимая погрешность не более  $1 \cdot 10^{-9}$  с. На концах звукопровода установлены резиновые звукопоглотители для подавления отраженных волн. Нагрев и измерения производятся одновременно. При этом измеряемый образец складывается из двух половинок.

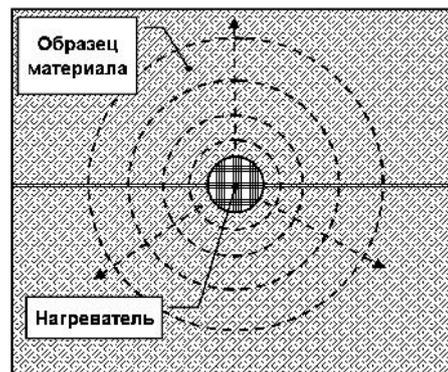


Рис. 1. Поперечное сечение цилиндрического теплового поля

При попытках реализовать в образце цилиндрическое поле нагрева (рис. 1), когда тепловой поток распространяется от нагревателя радиально, а изотермы образуют цилиндрические поверхности, имеют место следующие проблемы.

Во-первых, трудно обеспечить идеальный тепловой контакт с образцом по всей поверхности нагревателя. Воздушные промежутки прерывают тепловой поток.

Во-вторых, на динамику нагрева влияет не только теплосоппротивление, но и объемная теплоемкость исследуемого материала. Было проведено исследование этого влияния на модели в виде тепловой цепи (рис. 4). Результаты моделирования иллюстрирует рис. 5. Верхняя кривая соответствует росту температуры нагревателя при нулевой расчетной теплоемкости материала (пенопласт приближается к такому варианту). При этом влияние оказывает только

теплоемкость нагревателя. Такая одноемкостная цепь соответствует прогреву по экспоненте. Нижняя кривая соответствует прогреву для типового варианта (бетон, дерево и т.п.), когда объемная теплоемкость материала равна  $2 \cdot 10^6$  Дж·м<sup>-3</sup>·град<sup>-1</sup>. Очевидно, что теплоемкость материала очень существенно влияет на динамику прогрева.

В-третьих, требуется достаточно большое время для достижения установившегося теплового режима. Для нагревателя диаметром 0.2 мм расчетное время переходного процесса составляет приблизительно 180 с (3 мин.). Но это время пропорционально квадрату диаметра нагревателя (следует из теории подобия). Так, при диаметре 1 мм расчетное время прогрева перед измерением должно быть не менее одного часа. А возможность расчета установившейся температуры на начальном этапе прогрева (за счет экстраполяции кривой нагрева) затруднена, так как указанная кривая не является экспонентой (рис. 5, нижняя кривая).

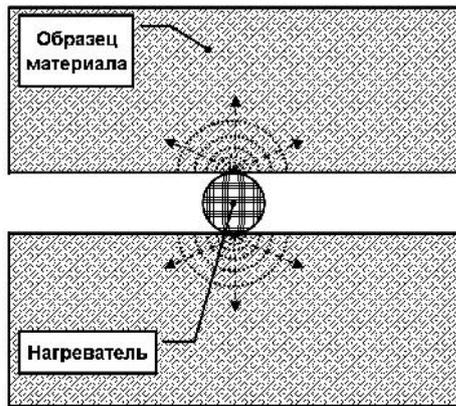


Рис. 2. Поперечное сечение теплового поля

Рассмотрим более детально использованную динамическую модель в виде тепловой цепи (рис.4). Для уменьшения количества варьируемых параметров и получения обобщенных выводов принята безразмерная форма представления переменных. Нагреватель генерирует (после включения) тепловой поток  $Q$ , принятый за единицу. Теплоемкость нагревателя  $C_0$  принята за единицу. Образец условно разделен на 10 концентрических слоев вокруг нагревателя. Для удобства принято, что радиусы слоев возрастают в геометрической прогрессии. При этом теплосопротивления всех слоев равны между собой (что следует из формулы (2)), а их сумма принята за единицу. То есть  $R_1 = R_2 = \dots = R_{10} = 0.1$ . При этом температура нагревателя  $\theta_0$  в установившемся режиме окажется равной единице. Теплосопротивление отдачи тепла в окружающую среду  $R_{11}$  считаем пренебрежимо малым. Для определенности принято значение 0.02.

Температура среды принята за 0. Показатель геометрической прогрессии для удобства принят равным  $\sqrt{2}$ . При этом площадь сечения первого слоя будет равна площади сечения нагревателя. Теплоемкости слоев пропорциональны площадям их поперечных сечений и образуют ряд:  $C_2 = 3 \cdot C_1$ ;  $C_3 = 5 \cdot C_1$ ;  $C_4 = 11 \cdot C_1$ ;  $C_5 = 21 \cdot C_1$ ;  $C_6 = 43 \cdot C_1$ ;  $C_7 = 85 \cdot C_1$ ;  $C_8 = 171 \cdot C_1$ ;  $C_9 = 341 \cdot C_1$ ;  $C_{10} = 683 \cdot C_1$ . Теплоемкость первого слоя  $C_1$  является единственным варьируемым параметром, влияние которого исследуется. Диапазон изменения  $C_1$  от 0 (пенопласт приближается к такому варианту) до 0.5 (для бетона, дерева, стекла, гипса и т.п. объемная теплоемкость примерно в два раза меньше, чем у никеля). Начальные условия нулевые. Модель реализована в программной среде VisSim. Цель моделирования: исследовать мешающее влияние объемной теплоемкости материала при измерениях удельного теплосопротивления. Результаты представлены на рис. 5.

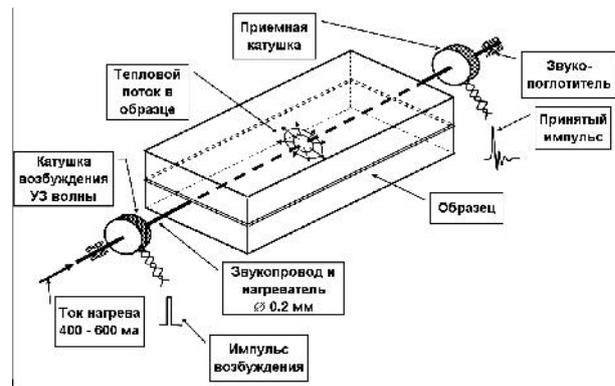


Рис. 3. Схема экспериментальной установки для определения удельного теплосопротивления

Как видим, теплоемкость материала очень существенно влияет на динамику прогрева.

Для преодоления вышеупомянутых проблем схема измерений была изменена (рис. 2). Нагреватель помещен между двумя плоскими пластинами из исследуемого материала (дерево, кирпич, пенопласт, стекло и т.д.). Тепловой контакт обеспечивается только по двум линиям касания вдоль нагревателя.

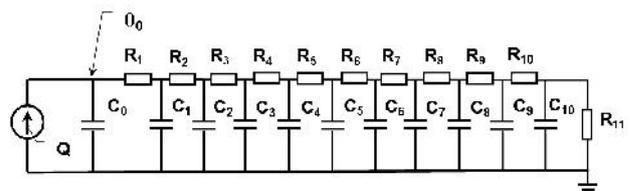


Рис. 4. Модель нагрева в виде тепловой цепи

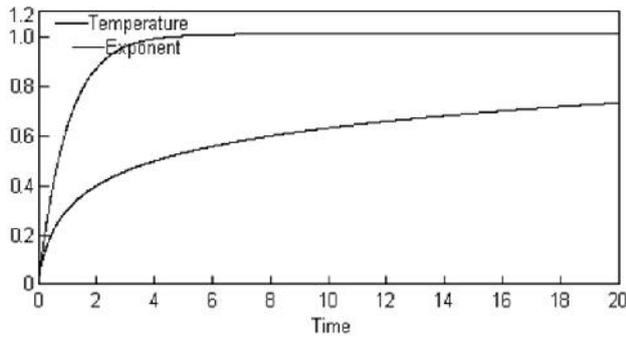


Рис. 5. Динамика возрастания температуры нагревателя по схеме рис. 1 при крайних значениях объемной теплоемкости исследуемого материала

Как оказалось, такая схема нагрева имеет ряд преимуществ перед традиционным вариантом на рис. 1. Во-первых, обеспечение хорошего теплового контакта гибкой проволоки с образцом по линиям касания не составляет проблемы для любых материалов без предварительной обработки. Как правило, все строительные материалы имеют гладкую лицевую поверхность.

Во-вторых, удается практически полностью исключить мешающее влияние объемной теплоемкости материала. Результаты моделирования (рис. 6) иллюстрируют сказанное. Верхняя кривая соответствует росту температуры нагревателя при нулевой расчетной теплоемкости материала. Нижняя кривая соответствует объемной теплоемкости материала  $2 \cdot 10^6$  Дж·м<sup>-3</sup>·град<sup>-1</sup> (бетон, стекло, гипс и т.п.). Как видим, теплоемкость материала практически не влияет на динамику прогрева. Физический смысл полученного эффекта состоит в следующем: объем прогреваемой области и, следовательно, ее теплоемкость уменьшаются на два порядка по сравнению с вариантом на рис. 1, а теплоемкость самого нагревателя не изменяется и становится подавляющей. Поэтому нагрев происходит практически по экспоненте (однородная схема). Теплосоппротивление же образца остается таким же, так оно инвариантно к изменениям масштаба, поэтому постоянная времени нагрева не изменяется по сравнению с рис. 1.

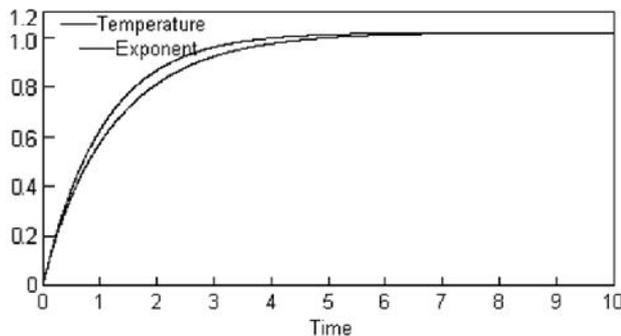


Рис. 6. Динамика возрастания температуры нагревателя по схеме рис. 2 при крайних значениях объемной теплоемкости исследуемого материала

В-третьих, установившийся режим теплового потока достигается значительно быстрее, так как объем прогреваемой области значительно уменьшен. Время измерения сокращается до 5 – 10 с.

Рассмотрим моделирование варианта на рис. 2 более детально. Принята гипотеза, что тепловое поле в первом приближении состоит из двух половинок цилиндрического поля. Поэтому использована та же тепловая цепь (рис. 4) в качестве модели. Принято допущение, что масштаб слоев уменьшается примерно в 10 раз по сравнению с вариантом на рис. 1. Теплоемкости слоев пропорциональны квадрату масштаба. Поэтому диапазон варьирования параметра  $C_1$  уменьшается в 100 раз (0 – 0.005). Аналогично уменьшаются все остальные емкости. Влиянием воздушного промежутка пренебрегаем, так как воздух имеет ничтожную объемную теплоемкость (1230 Дж·м<sup>-3</sup>·град<sup>-1</sup>) и в тонких щелях очень большое удельное теплосоппротивление (42 м·град/Вт).

Принятые допущения подтверждены экспериментально. На рис. 7 приведены графики прогрева нагревателя для разных материалов образца. Размерности переменных естественны. Время переходного процесса для основных строительных материалов (кроме пенопласта) не превосходит 10 с. Начальная скорость роста температуры всегда одна и та же, так как определяется только теплоемкостью нагревателя. Установившаяся температура пропорциональна удельному теплосоппротивлению материала. Но в качестве измеряемой величины лучше использовать постоянную времени нагрева, так как при этом исключается влияние многих потенциальных источников погрешностей. Например, установившаяся температура зависит от мощности нагревателя, а постоянная времени не зависит.

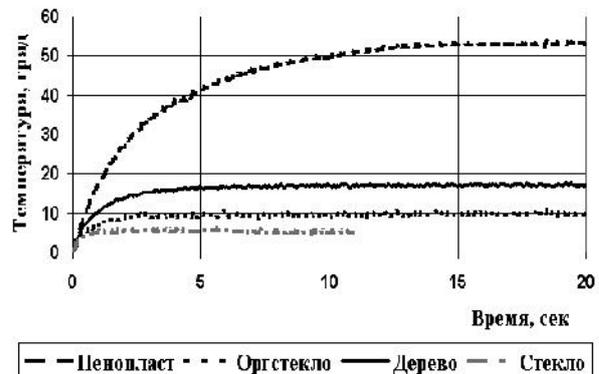


Рис. 7. Графики прогрева нагревателя для разных исследуемых материалов

Кривая роста температуры близка к экспоненте, то есть соответствует однородной модели прогрева (теплоемкость материала не

оказывает существенного влияния). Следовательно, постоянную времени нагрева  $\tau$  можно однозначно определить из эксперимента как отношение установившейся температуры к начальной скорости ее роста (рис. 8). Достаточное время эксперимента составляет 10  $\tau$ .

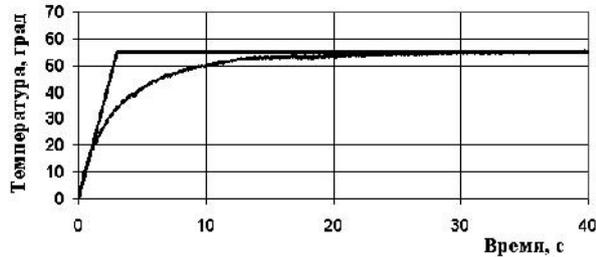


Рис. 8. Определение постоянной времени нагрева  $\tau$  по результатам эксперимента

Постоянная времени нагрева однозначно связана с удельным теплопроводностью материала (рис. 9) пропорциональной зависимостью.

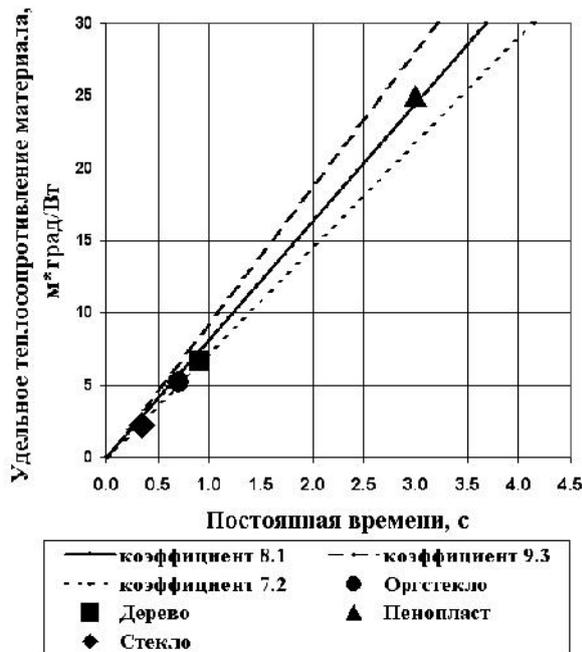


Рис. 9. Тарировочные графики

Теоретическая тарировочная формула получена из соотношения

$$\tau = R \cdot C, \tag{1}$$

где  $\tau$  — постоянная времени (с),  $C$  — теплоемкость нагревателя (Дж/град),  $R$  — теплопроводность образца (град/Вт).

Теплопроводность образца определяется по классической формуле для цилиндрического теплового поля [2]:

$$R = \frac{\ln\left(\frac{r_\infty}{r_0}\right)}{2\pi \cdot L} \cdot \rho, \tag{2}$$

где  $r_\infty$  — наружный радиус цилиндрического поля (принимается численное значение  $2.5 \cdot 10^{-3}$  м, соответствующее толщине стеклянной пластины);  $r_0$  — внутренний радиус цилиндрического поля (принимается численное значение  $1 \cdot 10^{-5}$  м, т.е. 0.1 от радиуса нагревателя);  $L$  — длина нагревателя, м (в окончательную формулу не входит);  $\rho$  — искомое удельное теплосопротивление исследуемого материала, м·град/Вт.

Теплоемкость нагревателя пропорциональна его объему и объемной теплоемкости:

$$C = \pi \cdot r_H^2 \cdot L \cdot \gamma, \tag{3}$$

где  $\gamma$  — объемная теплоемкость нагревателя (для никеля численное значение  $4.45 \cdot 10^6$  Дж·м<sup>-3</sup>·град<sup>-1</sup>);  $r_H$  — радиус нагревателя (численное значение  $1 \cdot 10^{-4}$  м).

После алгебраических преобразований найдем тарировочную формулу в общем виде:

$$\rho = \frac{2 \cdot \tau}{\ln\left(\frac{r_\infty}{r_0}\right) \cdot r_H^2 \cdot \gamma} \tag{4}$$

Подставив численные значения параметров, получим тарировочную формулу конкретно для нашей экспериментальной установки.

$$\rho = 8.1 \cdot \tau. \tag{5}$$

Формула (5) (сплошной график на рис. 9) позволяет вычислить удельное теплосопротивление исследуемого материала  $\rho$  в м·град/Вт по экспериментально полученной постоянной времени нагрева  $\tau$ , с.

Теоретическая формула (5) подтверждается экспериментальными данными (точки на графике). Постоянные времени нагрева для известных строительных материалов получены на экспериментальной установке (рис. 3). Соответствующие удельные теплосопротивления материалов взяты из справочных источников.

Коэффициент пропорциональности в формуле (5) зависит от неконтролируемого параметра  $r_0$  ( $2r_0$  — это фактически ширина области контакта образца с нагревателем), что вызывает погрешности измерения. Однако оказалось, что указанная зависимость не очень существенна. Увеличение (уменьшение) расчетного значения  $r_0$  в два раза приводит к изменению коэффициента пропорциональности не более чем на  $\pm 15\%$  (рис. 9, пунктирная и точечная линия). Если принять меры к стабилизации силы прижатия образца к нагревателю, то этот источник погрешности может быть нейтрализован. В эксперименте увеличение силы прижатия в два раза вообще не приводило к заметным изменениям результата измерения.

## Выводы

Предлагается при измерениях удельного теплосопротивления линейный проволочный нагреватель (он же измеритель температуры) помещать между двумя плоскими пластинами из исследуемого материала, что дает следующие преимущества.

Обеспечение хорошего теплового контакта гибкой тонкой проволоки с пластинами из исследуемого материала по линиям касания не составляет проблемы для любых материалов и не требует предварительной подготовки.

Искомое удельное теплосопротивление материала вычисляется умножением постоянной времени нагрева в секундах, полученной экспериментально, на тарировочный коэффициент. Последний легко вычисляется теоретически и может быть уточнен экспериментально.

Удается практически полностью исключить мешающее влияние объемной теплоемкости материала и ряд других факторов на результат измерения. Установившийся режим теплового потока достигается весьма быстро. Измерение можно осуществить за пять – десять секунд.

Не требуется образец материала большой толщины. Толщина исследуемого материала в 2.5 мм (стекло) на два порядка превосходит размер зоны теплового контакта, что вполне достаточно для исключения влияния формы образца и внешних условий на результаты измерений.

Размер области теплового контакта нагревателя с измеряемым материалом является неконтролируемым параметром. Однако чувствительность результата измерения к этому параметру невелика. Принятие мер по стабилизации силы прижатия образца к нагревателю позволяет нейтрализовать возмущающее влияние этого параметра на результаты измерений.

## Список литературы

1. Платунов Е.С. *Теплофизические измерения и приборы.* – Ленинград: Машиностроение, 1986. – 365 с.
2. *Методы определения теплопроводности и температуропроводности / Под ред. Лыкова А.В.* – М., 1973 – 336 с.
3. Шикалов В.С., Пристайло Т.Ю. *Цифровой прилад для вимірювання теплофізичних параметрів матеріалів // Управління розвитком складних систем.* - 2011. - Вип. 7 – С. 138-141.
4. *ГОСТ 30256-94. Межгосударственный стандарт. Материалы и изделия строительные. Метод определения теплопроводности цилиндрическим зондом.* - МНТКС, Москва, 1994. – 11 с.

Статья поступила в редколлегию 12.02.2013

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. М.В. Мыслович, зав. научным отделом Института электродинамики НАН Украины, Киев.