

УДК 581.341

Иносов Сергей Викторович

Кандидат технических наук, доцент кафедры автоматизации технологических процессов, ORCID: 0000-0001-8305-5514

Киевский национальный университет строительства и архитектуры, Киев

Пристайло Тарас Юрьевич

Ассистент кафедры автоматизации технологических процессов, ORCID: 0000-0002-1273-6168

Киевский национальный университет строительства и архитектуры, Киев

ИЗМЕРЕНИЕ УДЕЛЬНОГО ТЕПЛОСОПРОТИВЛЕНИЯ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРОВОЛОЧНЫМ ЗОНДОМ В КВАЗИСТАЦИОНАРНОМ РЕЖИМЕ

Аннотация. Быстрые нестационарные методы измерения теплопроводности необходимы для получения оперативных данных о теплоизолирующих свойствах строительных материалов в условиях производства и эксплуатации. Предложен метод измерения удельного теплосопротивления твердых материалов проволочным нагревателем (он же измеритель температуры), помещенным между двумя плоскими пластинами из исследуемого материала. Время нагрева небольшое, стабилизированное. Изложены результаты исследования предлагаемой схемы измерения. Приведена компьютерная модель и экспериментальные результаты с целью обоснования ее преимуществ.

Ключевые слова: строительные материалы; измерение теплопроводности; удельное теплосопротивление; проволочный нагреватель; квазистатический нагрев

Постановка проблемы

Известны способы измерения удельного теплосопротивления (теплопроводности) строительных материалов с цилиндрическим зондом в качестве источника тепла [1; 4; 7]. Нагревателем является металлическая проволока, через которую пропускается постоянный электрический ток. Конструкция помещена во внешний металлический полый каркас (зонд). Тепловой контакт между нагревателем и зондом обеспечивается заполнением внутреннего объема зонда теплопроводящей жидкостью. Температура измеряется датчиком температуры, как правило, это терморпара либо терморезистор. Перед началом измерения зонд помещается внутрь исследуемого материала. Искомая удельная теплопроводность вычисляется по результатам полученных динамических характеристик процесса нагрева зонда. Однако, такая схема измерений связана с рядом нерешенных практических проблем и наличием источников погрешностей.

Анализ последних исследований и публикаций

При использовании известных зондовых измерителей удельного теплосопротивления создается цилиндрическое тепловое поле в исследуемом образце, когда тепловой поток распространяется от цилиндрического зонда

радиально, а изотермы образуют цилиндрические поверхности [7]. Этот способ измерений имеет известные недостатки: невозможно на практике обеспечить достаточно плотный тепловой контакт с твердым образцом по всей поверхности нагревателя; существенное влияние на результаты измерения не только теплосопротивления, но и объемной теплоемкости исследуемого материала, которая заранее неизвестна; в случае применения режима установившегося теплового поля необходимо длительное время для его достижения, которое пропорционально квадрату диаметра зонда и при диаметре последнего 5 мм достигает многих часов.

В предыдущей публикации [8] мы предложили использовать нагреватель (он же зонд, он же измеритель температуры) в виде тонкой никелевой проволоки диаметром 0,2 мм, а вместо обволакивающего теплового контакта образца с нагревателем использовать касательный тепловой контакт. Нагрев осуществлялся постоянным током до достижения установившейся температуры. Для измерения температуры использовалась зависимость скорости распространения ультразвука в проволоке от температуры. Ультразвук генерировался за счет магнитострикционного эффекта. Оказалось, что такой метод измерения удельного теплосопротивления является перспективным и заслуживает дальнейшего исследования и развития.

Цель исследования

В процессе усовершенствования экспериментальной установки оказалось целесообразным увеличить интенсивность нагрева за счет ограничения времени нагрева и перейти к более простому и надежному методу измерения температуры за счет изменения электрического сопротивления проволоки в процессе нагрева. На рис. 1 приведена схема модифицированной экспериментальной установки для определения удельного теплосопrotивления строительных материалов.

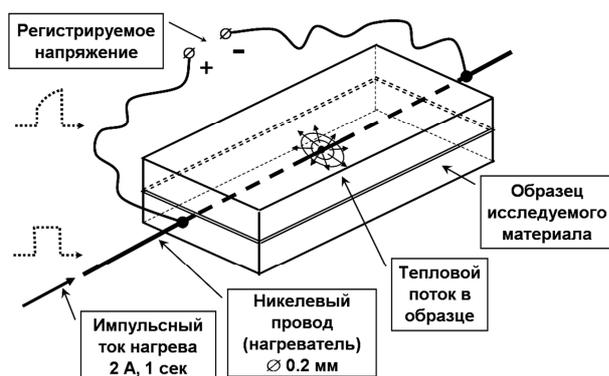


Рисунок 1 – Схема экспериментальной установки для определения удельного теплосопrotивления

В качестве нагревателя и датчика температуры использована никелевая проволока диаметром 0.2 мм и длиной 25 см. Проволока нагревается импульсным электрическим током 2 А длительностью 1 сек. Указанные параметры стабилизированы. По мере нагрева увеличивается электрическое сопротивление проволоки и соответственно регистрируемое напряжение. Нагрев и измерения производятся одновременно. Нагреватель помещается между двумя пластинами исследуемого материала. В зависимости от удельного теплосопrotивления образца меняется отбор тепла от нагревателя, температура нагрева и регистрируемое напряжение. Изменения напряжения обрабатываются с помощью 10-разрядного аналого-цифрового преобразователя и результаты сохраняются в память микроконтроллера для последующего анализа.

Указанный набор параметров установки является результатом компромисса между многими противоречивыми требованиями.

Выбор никеля объясняется его большим удельным электросопrotивлением, высоким температурным коэффициентом, стабильными характеристиками. Он не окисляется, достаточно прочен, гибок и тверд.

Увеличение диаметра нагревателя потребовало бы резкого увеличения тока нагрева и времени измерения. Нагреватель меньшего диаметра непрочен.

Кратковременность нагрева позволяет ограничить перегрев 100 градусами при работе с «теплым» материалом типа поролонa и одновременно достичь существенного нагрева до 25 градусов при работе с «холодным» материалом типа стекла за счет повышенной мощности нагрева. Кроме того, глубина проникновения теплового поля в образец становится контролируемой.

Ниже излагаются результаты исследования предлагаемой схемы измерения экспериментально и с помощью компьютерной модели с целью обоснования ее преимуществ.

Изложение основного материала

При измерениях удельного теплосопrotивления воздуха, поролонa, мягкой пористой резины в образце реализуется цилиндрическое поле нагрева (рис. 2). Тепловой поток распространяется от нагревателя радиально, а изотермы образуют цилиндрические поверхности. Такие материалы имеют большое удельное теплосопrotивление и весьма малую объемную теплоемкость, поэтому, в сравнении с твердыми материалами, описанные далее проблемы не возникают.

При измерении теплопроводности твердых материалов (стекло, оргстекло и т.п.) возникают следующие проблемы.

1. Невозможно обеспечить идеальный тепловой контакт с образцом по всей поверхности нагревателя. Малейшие воздушные промежутки прерывают тепловой поток. Использование теплопроводящих смазок искажает результаты измерения. В твердых материалах (стекло) создание полости для нагревателя крайне затруднительно.

2. На динамику нагрева влияет не только теплосопrotивление, но и объемная теплоемкость исследуемого материала, которая для твердых материалов существенна и заранее неизвестна.

3. Требуется значительное время для достижения установившегося теплового режима.

Для преодоления вышеупомянутых проблем для твердых материалов предлагается схема измерений с касательным тепловым контактом (рис. 3). Нагреватель помещен между двумя плоскими пластинами из исследуемого материала (дерево, плитки, стекло и т.д.). Тепловой контакт обеспечивается только по двум линиям касания вдоль нагревателя.

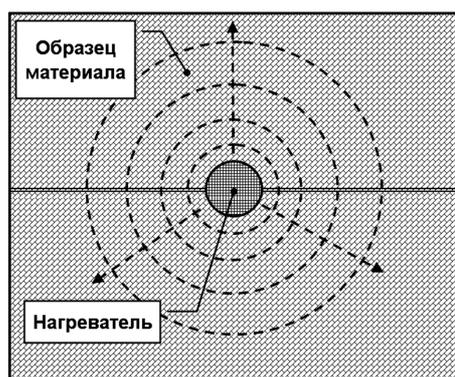


Рисунок 2 - Поперечное сечение теплового поля в случае обволакивающего теплового контакта

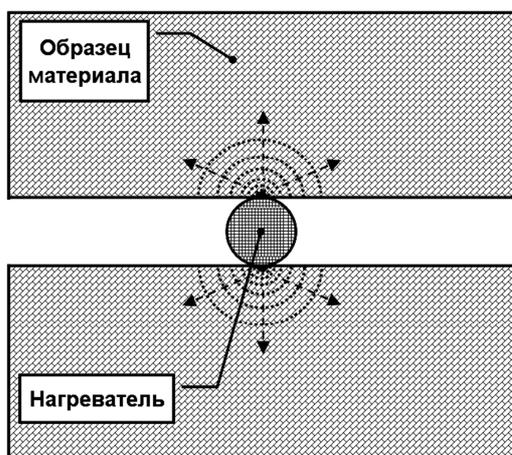


Рисунок 3 - Поперечное сечение теплового поля в случае касательного теплового контакта

Как оказалось, такая схема нагрева имеет ряд преимуществ перед вариантом на рис. 2.

Во-первых, обеспечение хорошего теплового контакта гибкой проволоки с образцом по линиям касания не составляет проблемы для твердых материалов, даже без их предварительной обработки. Как правило, все строительные материалы имеют гладкую лицевую поверхность.

Во-вторых, удастся практически полностью исключить мешающее влияние неопределенной объемной теплоемкости материала. Физический смысл полученного эффекта состоит в следующем: объем прогреваемой области и ее теплоемкость уменьшаются на два порядка (по сравнению с вариантом на рис. 2) и становятся пренебрежимо малой по сравнению с теплоемкостью нагревателя. В результате режим нагрева образца становится квазистационарным.

В-третьих, время измерения можно сократить до 1 сек. За это время температура среды, влажность образца и многие другие мешающие факторы не успевают существенно измениться и поэтому не требуют стабилизации.

В-четвертых, не требуется образец материала большой толщины. Глубина проникновения теплового поля в образец не превышает 1 мм. Можно проводить измерения с теплоизолирующими красками [9], пленками и т.п.

Предлагаемый метод измерения сочетает достоинства динамических (быстрота) и статических (нечувствительность к влиянию теплоемкости материала) методов измерения. Измерительная установка дешева и проста.

Априори ожидалось, что неконтролируемость площади теплового контакта нагревателя с измеряемым материалом будет основным недостатком предлагаемой схемы измерения и основным источником погрешности. Однако эти опасения не подтвердились. Эксперимент и расчеты показали, что чувствительность результата измерения к нестабильности теплового контакта незначительна, а сам тепловой контакт практически не зависит от силы прижатия образца к нагревателю.

Для правильного планирования экспериментов и интерпретации их результатов параллельно осуществлялось компьютерное моделирование динамики нагрева в реальном времени. Используемая модель нагрева в виде тепловой цепи приведена на рис. 4.

Источник теплового потока (нагреватель) генерирует (в течение одной секунды) мощность нагрева Q (Вт), определяемую формулой:

$$Q = I^2 r, \quad (1)$$

где I – электрический ток, А; r – электрическое сопротивление нагревателя, Ом, зависящее от температуры нагревателя θ_0 , град. Для никеля, для температур ниже 200°C , r рассчитывают по формуле полинома второго порядка:

$$r = r_0(1 + a\theta_0 + b\theta_0^2), \quad (2)$$

где r_0 – начальное электрическое сопротивление нагревателя при 20°C , равно 0.82 Ом.

Коэффициенты полинома для никеля:

$$a = 5,17 \cdot 10^{-3} \text{ град}^{-1};$$

$$b = 7,06 \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$$

Теплоемкость нагревателя (Дж/град) обозначена C_0 . Она рассчитывается как произведение объемной теплоемкости никеля ($4,45 \cdot 10^6 \text{ Дж} \cdot \text{м}^{-3} \cdot \text{град}^{-1}$) на объем нагревателя ($8,80 \cdot 10^{-9} \text{ м}^3$) и составляет 0.039 Дж/град.

Образец условно разделен на 18 концентрических слоев вокруг нагревателя (рис. 2). Примерно на такую глубину распространяется тепловая волна за одну секунду, как показало последующее моделирование. Для удобства принято, что диаметры слоев возрастают в геометрической прогрессии. Показатель геометрической прогрессии принят равным $\sqrt{2}$.

При этом теплосопровитления (град/Вт) всех слоев $R_1 - R_{18}$ равны между собой и определяются по классической формуле теплосопровитления R цилиндрического стационарного теплового поля [5]:

$$R = \frac{\ln\left(\frac{D}{d}\right)}{2\pi \cdot L} \cdot \rho, \quad (3)$$

где D/d – отношение наружного D и внутреннего d диаметров цилиндрического слоя; L – длина нагревателя, м; ρ – удельное теплосопровитление материала образца, м·град/Вт.

Теплосопровитление отдачи тепла в окружающую среду R_{19} считаем пренебрежимо малым.

Температуры слоев (в град) обозначены как $\theta_1 - \theta_{18}$. Температура среды принята за 0.

Теплоемкости слоев $C_1 - C_{18}$ (Дж/град) возрастают в геометрической прогрессии с показателем 2. Они рассчитываются как произведение объемной теплоемкости материала χ (Дж·м⁻³·град⁻¹) на объем слоя V_i (м³) и определяются по формуле:

$$C_i = V_i \cdot \chi = \frac{\pi}{4} (D_i^2 - d_i^2) \cdot \chi \cdot L, \quad (4)$$

где i – номер слоя. Теплоемкости и теплосопровитления являются константами для конкретного эксперимента. Все остальные величины изменяются во времени. Начальные значения температур нулевые.

Модель реализована в программной среде VisSim.

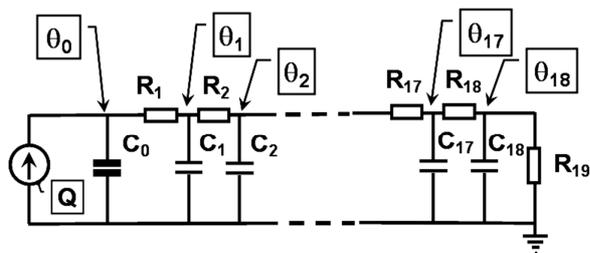


Рисунок 4 - Модель нагрева в виде многоемкостной тепловой цепи

Для случая касательного теплового контакта (рис. 3) применялась та же модель (рис. 4) на основании следующих гипотез:

1. Считаем, что две половинки касательного теплового поля на рис. 3 геометрически подобны половинкам обволакивающего теплового поля на рис. 2;

2. Принимаем, что масштаб слоев на рис. 3 уменьшается примерно в 25 раз по сравнению с вариантом на рис. 4. Теплоемкости слоев $C_1 - C_{18}$ пропорциональны квадрату масштаба.

Поэтому они уменьшаются в $25^2 = 625$ раз по сравнению с вариантом на рис. 2 и становятся пренебрежимо малыми по сравнению с теплоемкостью нагревателя C_0 . Остальные параметры модели остаются прежними;

3. Влиянием воздушного промежутка пренебрегаем, так как воздух имеет очень малую объемную теплоемкость и в тонкие щели обладают очень большим удельным теплосопровитлением.

В случае принятия указанных гипотез, результаты моделирования (модель на рис. 4) подтверждаются результатами экспериментов. В качестве иллюстрации на рис. 5, 6 представлены графики возрастания электрического напряжения на нагревателе для разных исследуемых материалов. При моделировании приняты следующие справочные значения удельных теплосопровитлений материалов (м·град/Вт): воздух – 42; поролон – 25; оргстекло – 5,2; стекло – 2,2.

Соответствующие объемные теплоемкости (Дж·м⁻³·град⁻¹): $1,23 \cdot 10^3$; $8,25 \cdot 10^4$; $1,75 \cdot 10^6$; $2,0 \cdot 10^6$.

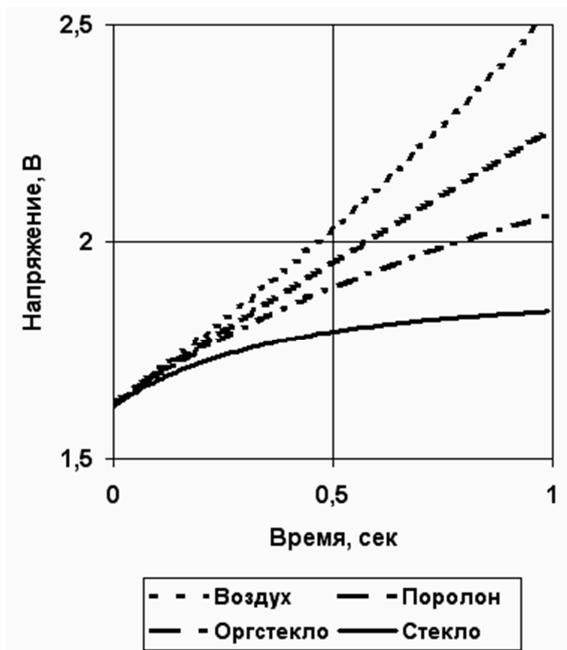


Рисунок 5 - Динамика возрастания электрического напряжения на нагревателе для разных исследуемых материалов. Результаты моделирования

Графики для воздуха и поролона соответствуют облегающему тепловому контакту (рис. 2), графики для стекла и оргстекла соответствуют касательному контакту (рис. 3).

В случае поролона и воздуха переходной процесс перестает стремиться к установившемуся режиму из-за усиления положительной обратной связи по следующему механизму. Рост температуры приводит к возрастанию электросопровитления нагревателя, что увеличивает мощность нагрева,

что, в свою очередь, еще больше ускоряет рост температуры. Однако ограничение времени нагрева (1 сек) позволяет использовать для измерения даже такие неустойчивые процессы, что было бы невозможно для статических методов измерения.

В результате экспериментальных исследований и моделирования выявлено следующее.

Так как теплоемкость области нагрева образца незначительна по сравнению с теплоемкостью нагревателя, процесс нагрева достаточно точно может быть описан одноемкостной моделью (рис. 7), где R – эквивалентное теплосопrotивление образца.

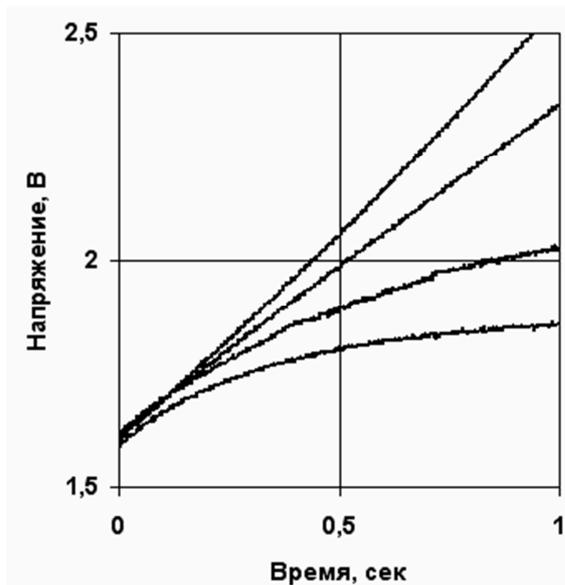


Рисунок 6 – Динамика возрастания электрического напряжения на нагревателе для разных исследуемых материалов. Результаты эксперимента

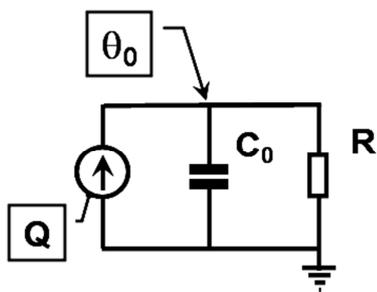
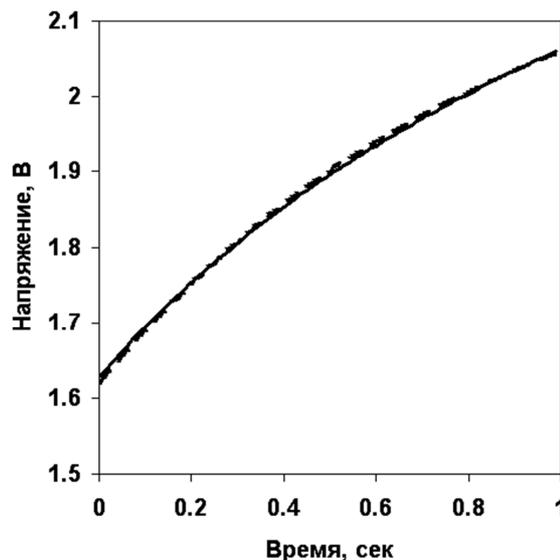


Рисунок 7 – Упрощенная модель нагрева в виде одноемкостной тепловой цепи

В качестве иллюстрации на рис. 8 приведены практически идентичные графики возрастания электрического напряжения на нагревателе для многоемкостной и эквивалентной одноемкостной моделей (исследуемый материал – оргстекло).

Это значит, что тепловая инерционность материала образца пренебрежимо мала по сравнению с тепловой инерционностью нагревателя и образец прогревается в квазистационарном режиме.

Квазистационарность теплового поля подтверждается графиком распределения температур по радиусу теплового поля в конце прогрева (рис. 9). Тепловой контакт по схеме рис. 3. Расчетная модель многоемкостная (рис. 4). График распределения температур логарифмический, что соответствует стационарному режиму. Только на переднем фронте тепловой волны имеют место динамические явления. Квазистационарность означает, что хотя распространение теплового поля продолжается, распределение температур близко к равновесному. Точками на графике отмечены четные слои модели. Теплосопrotивления слоев одинаковы, поэтому равновесное распределение температур по слоям соответствует прямой линии.



— Многоемкостная модель
- - Одноемкостная модель

Рис. 8 - Динамика возрастания электрического напряжения на нагревателе

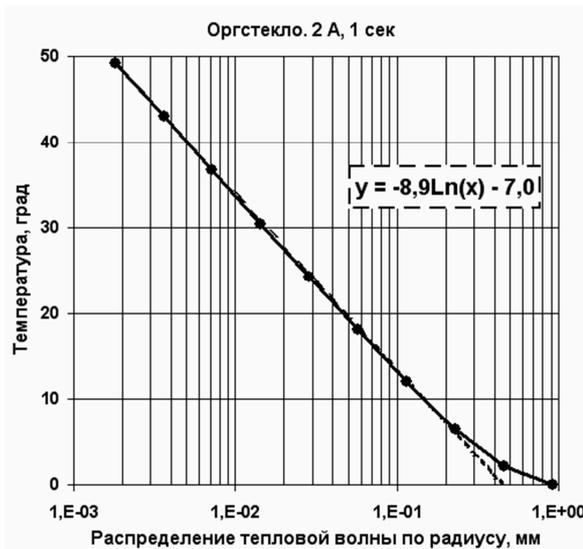


Рисунок 9 - Распределение температуры по радиусу теплового поля через 1 сек от начала прогрева

Теплосопротивление цилиндрического теплового поля R в квазистационарном режиме пропорционально удельному теплосопротивлению материала ρ (3). Но коэффициент пропорциональности зависит от относительной глубины проникновения тепловой волны, точнее от $\ln(D/d)$, где D/d – отношение наружного D и внутреннего d диаметров теплового поля. Нестабильность этого отношения (вызванная неопределенностью удельной теплоемкости образца, площади теплового контакта или другими факторами) может служить источником погрешности. Однако чувствительность коэффициента пропорциональности к изменениям D/d весьма мала при больших значениях D/d и для рассматриваемого примера ($D/d \approx 500$) составляет всего 0,1. То есть нестабильность параметров теплового поля до 20% приведет к погрешности измерения не более 2%. Таким образом, в первом приближении (с коэффициентом чувствительности равным единице) на результат измерения влияет только измеряемое удельное теплосопротивление материала ρ (любые другие мешающие влияния на порядок меньше).

Непосредственным измерением можно определить приращение электрического напряжения на нагревателе за время нагрева. На рис. 10 приведены тарировочные графики и формулы для определения удельного теплосопротивления исследуемого материала по измеренному приращению напряжения. Сплошная линия соответствует касательному тепловому контакту по схеме рис. 3 для твердых материалов с глубиной проникновения теплового поля до 1 мм. Пунктирная линия соответствует обволакивающему тепловому контакту для мягких материалов по схеме рис. 2, с глубиной проникновения теплового поля до 10 мм. Тарировочные зависимости получены компьютерным моделированием (схема на рис. 4). Для некоторых материалов с известным (из справочных таблиц) удельным теплосопротивлением указанные зависимости подтверждены экспериментально. Совпадение результатов в пределах нескольких процентов. За пределами отмеченных диапазонов измерение также возможно, но с введением небольших поправок.

Преимущества описанной методики измерения иллюстрирует, например, такое исследование. Экспериментально установлено, что мокрая древесина имеет удельное теплосопротивление в 2,5 раза меньше, чем сухая. Благодаря малому времени измерения (1 сек) влажность образца в процессе

нагрева гарантировано оставалась неизменной, чего нельзя сказать про традиционные методы измерения с длительным временем нагрева.

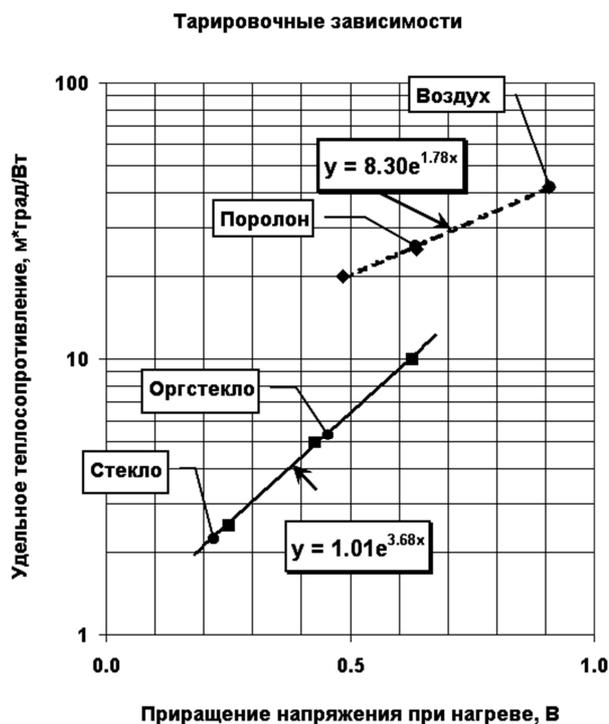


Рисунок 10 – Тарировочные зависимости

Выводы

Предлагается при измерениях удельного теплосопротивления твердых материалов 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 и не требует предварительной подготовки.

Искомое удельное теплосопротивление материала вычисляется по тарировочным формулам в зависимости от приращения напряжения на нагревателе за время прогрева. Тарировочные формулы вычисляются компьютерным моделированием и могут быть уточнены экспериментально.

Удается практически полностью исключить мешающее влияние объемной теплоемкости материала и ряда других факторов на результат измерения благодаря квазистационарности режима прогрева.

Измерение осуществляется всего за 1 секунду, что удобно при экспресс-анализах. При этом автоматически исключается мешающее влияние медленно изменяющихся факторов (температуры среды, влажности образца и т.п.) Измерительная установка дешева и проста.

Не требуется образец материала большой толщины. Глубина проникновения теплового поля

не превышает 1 мм. Можно проводить измерения с теплоизолирующими красками, пленками и т.п.

В первом приближении (с коэффициентом чувствительности равным единице) на результат измерения влияет только измеряемое удельное теплосопротивление материала ρ (чувствительность к любым другим мешающим влияниям на порядок меньше).

Список литературы

1. Платунов Е.С. и др. 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. Технологічні вимірювання: навч. посібник. – К.: Кондор, 2006. – 165 с.
4. Шикалов В.С. Цифровий прилад для вимірювання теплофізичних параметрів матеріалів [Текст] / В. С. Шикалов, Т. Ю. Пристайло // Управління розвитком складних систем. - 2011. - № 7. – С. 138-141 .
5. Карслоу Г., Егер Д. Теплопроводность твердых тел (пер. с англ. под ред. проф. Померанцева А.А.). – М.: Наука, 1964.- 488 с.
6. Кондратьев Г.М., Дульнев Г.Н., Платунов Е.С., Ярышев Н.А. Прикладная физика: Теплообмен в приборостроении. – СПб: СПбГУ ИТМО, 2003. – 560 с.
7. ГОСТ 30256-94. Межгосударственный стандарт. Материалы и изделия строительные. Метод определения теплопроводности цилиндрическим зондом. – М. : МНТКС: 1994. – 11 с.
8. Иносов С.В., Т.Ю. Пристайло, В.С. Шикалов. Идентификация динамических характеристик магнитострикционного датчика удельного теплосопротивления строительных материалов [Текст] / С. В. Иносов, Т. Ю. Пристайло, В. С. Шикалов // Управління розвитком складних систем. – 2013. – № 13. – С. 166-171.
9. Декуша Л.В и др. О реальных физических свойствах и возможностях “теплоизолирующих” красок // Пром. Теплотехника. – К. – т. 28. – № 5. – С. 93 – 96.

Статья поступила в редколлегию 27.03.2015

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

Иносов Сергій Вікторович

Кандидат технічних наук, доцент кафедри автоматизації технологічних процесів, *ORCID: 0000-0001-8305-5514*
Київський національний університет будівництва і архітектури, Київ

Пристайло Тарас Юрійович

Асистент кафедри автоматизації технологічних процесів, *ORCID: 0000-0002-1273-6168*
Київський національний університет будівництва і архітектури, Київ

ВИМІРЮВАННЯ ПИТОМОГО ТЕПЛОПОРУ БУДІВЕЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ ДРОТОВИМ ЗОНДОМ У КВАЗІСТАЦІОНАРНОМУ РЕЖИМІ

Анотація. Для отримання оперативних даних про теплоізолюючі властивості будівельних матеріалів в умовах виробництва та експлуатації необхідно використовувати швидкі нестационарні засоби виміру теплопроводності. Запропоновано метод вимірювання питомого теплоопору твердих матеріалів дротовим нагрівачем (він же вимірювач температури), який розміщено між двома плоскими пластинками з матеріалу, що досліджується. Час нагрівання невеликий, стабілізований. Викладено результати дослідження запропонованої схеми вимірювання. Наведено комп'ютерну модель і експериментальні результати з метою обґрунтування її переваг.

Ключові слова: будівельні матеріали; вимірювання теплопроводності; питомий теплоопір; дротовий нагрівач; квазістатичне нагрівання

Inosov Sergei

Doctor of Philosophy, Department of Process Automation, ORCID: 0000-0001-8305-5514
Kyiv National University of Construction and Architecture, Kiev

Prystajlo Taras

Assistant, Department of Process Automation, ORCID: 0000-0002-1273-6168
Kyiv National University of Construction and Architecture, Kiev

**MEASUREMENT OF THE SPECIFIC THERMAL RESISTANCE OF BUILDING MATERIALS
WITH WIRE PROBE IN QUASI-STATIONARY MODE**

Abstract. Fast transient methods for measuring thermal conductivity are necessary for getting operational data on the heat-insulating properties of building materials. A method for measuring the specific thermal resistance of solid materials with wire heater (also known as temperature meter), being placed between two flat plates of the test material has been proposed. The heating time is stabilized. The results of experimental studies of the proposed measurement scheme are presented. A computer model and the experimental results are presented in order to justify benefits of the scheme. It is possible to virtually eliminate interferences of volume heat capacity of the material and other factors on the measurement results, due to quasi-stationary heating mode. Measurement takes only 1 second, which is convenient for express analysis. Interferences of slowly changing factors (ambient temperature, humidity of the sample, etc.) are automatically excluded. The measurement installation is cheap and simple. There is no need for a thick sample of material. The depth of penetration of the thermal field is not more than 1 mm. It is possible to perform measurements with insulating paints, films, etc.

Keywords: building materials; measurement of thermal conductivity; specific heat resistance; wire heater; quasi-static heating

References

1. Platonov, E.S., & others. (1986). *Thermalphysic measurements and instruments*. Leningrad, Russia: Mashinostroenie, 365.
2. Lykov, A.V. (Ed.) (1973). *Methods of estimation of thermal conductivity and thermal diffusivity*. Moscow, Russia, 336.
3. Shikalov, V.S. (2006). *Technological measurements. Teaching aid*. Kyiv, Ukraine: Kondor, 165.
4. Shikalov, V.S., & Prystailo, T.Y. (2011). *Digital instrument for measuring thermalphysic parameters of materials. Management of development of difficult systems*. Kyiv, Ukraine: 7, 138-141.
5. Karslow, G., & Eger, D. (1964). *Thermal conductivity of solid bodies*. Moscow, Russia [in Russian]: Science, 488.
6. Kondratiev, G.M., Dulnev, G.N., Platonov, E.S., & Yaryshev, N.A. (2003). *Applied physics: Heat exchange in instrument engineering*. St. Petersburg, Russia: St. Petersburg State University, 560.
7. (1994). *State Standard 30256-94. International standard. Construction materials and products. Method of evaluating thermal conductivity with cylindrical probe*. Moscow, Russia: MNTKS, 11.
8. Inosov, S.V., Prystailo, T.Y. & Shikalov, V.S. (2013). *Identification of dynamic characteristics of magnetostrictive sensor of specific thermal resistance of construction materials. Management of development of difficult systems*. Kyiv, Ukraine: 13, 166-171.
9. Dekusha, L.V., & others. *About real physical properties and possibilities of "heat-insulating" paints. Industrial heat engineering*. Kyiv, Ukraine: v. 28, 5, 93 – 96.

Посилання на публікацію

- APA Inosov Sergei, & Prystajlo Taras (2015). *Measurement of the specific thermal resistance of building materials with wire probe in quasi-stationary mode. Management of Development of Complex Systems*, 22 (1), 199-206.
- ГОСТ Иносов, С. В. Измерение удельного теплосопротивления строительных материалов проволоочным зондом в квазистационарном режиме [Текст] / С.В. Иносов, Т.Ю. Пристайло // *Управление развитием сложных систем*. – 2015. – № 22 (1). – С. 199-206.