

УДК 536.2:536.3:536.6:629.7:697.34

ДЕКУША Л.В., МЕНДЕЛЕЕВА Т.В., ВОРОБЬЕВ Л.И., ДЕКУША О.Л.

Институт технической теплофизики НАН Украины

МЕТОД ЛОКАЛЬНОГО ТЕПЛОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ (ЗОНДОВЫЙ МЕТОД) ИЗМЕРЕНИЯ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ МАТЕРИАЛОВ С ВЫНОСНЫМИ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯМИ ТЕМПЕРАТУРЫ

Запропоновано метод локальної теплової дії, що його застосовують для вимірювання теплопровідності твердих матеріалів, з розміщенням вимірювача температури (ИТ) за межами плями теплової дії. Доведено, що при такому розміщенні ИТ контактний термічний опір значно менше спотворює результат вимірювання.

Визначено ступінь впливу коефіцієнту конвективно-радіаційного теплообміну поверхні досліджуваного об'єкту з довкіллям, площі плями теплової дії та місця розташування ИТ на значення вимірюваних величин.

Предложен метод локального теплового воздействия, применяемый для измерения теплопроводности твердых материалов, с размещением измерителя температуры (ИТ) за пределами пятна теплового воздействия. Доказано, что при таком размещении ИТ контактное термическое сопротивление значительно меньше искажает результат измерения.

Определена степень влияния коэффициента конвективно-радиационного теплообмена поверхности исследуемого объекта с окружающей средой, площади пятна теплового воздействия и места расположения ИТ на значения измеряемых величин.

The method of local thermal action applied to measurement of heat conductivity of firm materials, with accommodation of a measuring instrument of temperature (ИТ) outside a spot of thermal action is offered. It is proved, that at such accommodation ИТ contact thermal resistance deforms measurement result much less.

The degree of influence of convective-radiating heat transfer coefficient between investigated object surface and environment, of the spot of thermal action area and location ИТ on measured values is certain.

$B_i = \alpha \cdot r_{ПТП} / \lambda$ – критерий Био;
 J_0, J_1 – функции Бесселя первого рода нулевого и первого порядка;
 q – плотность потока теплового воздействия;
 r – радиус;
 R – термическое сопротивление;
 α – коэффициент теплообмена;
 λ – коэффициент теплопроводности;
 $\vartheta(\rho, \zeta)$ – избыточная температура;

ρ, ζ – безразмерные цилиндрические координаты;
Индексы:
 e – эффективный;
ИЗМ – измеренная величина;
КОИТ – контактный;
ЛОК – локальный;
НАГР – нагреватель;
ПТП – преобразователь теплового потока;
СР – среднеинтегральный.

При измерении зондовым методом [1] теплопроводности материала на точность измерения влияют такие факторы, как наличие конвективного теплообмена на поверхности исследуемого образца, теплопроводность самого образца, величина пятна теплового воздействия, контактное термическое сопротивление между преобразователем температуры и контролируемым объектом. В работах [2-6] рассмотрен метод расчета, определена степень влияния каждого из этих факторов и разработаны рекомендации по минимизации их влияния.

В частности, показано, что для всех материалов, коэффициент теплопроводности которых $\lambda > 0,1 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$, следует предпринимать меры по существенному снижению или исключению контактного термического сопротивления, например, с помощью шлифовки, различных смазок, включая металлические эвтектики, ленточных термопар на эластичных прокладках или выносных дифференциальных термопар с промежуточным термоэлектродом из контролируемого материала.

В настоящей статье исследован и предложен способ уменьшения погрешности измерения зондовым методом, заключающийся в том, что преобразователи температуры вынесены за пределы зоны локального теплового воздействия и расположены на свободной поверхности образца.

Во всех упомянутых выше работах зондовый метод измерения теплопроводности материалов реализован так, что весь подводимый поток q от источника теплоты проходит через площадь контакта преобразователя теплового потока с поверхностью контролируемого объекта, а преобразователь температуры измеряет локальную температуру в центре пятна теплового воздействия. Таким образом, радиус пятна теплового воздействия равен радиусу ПТП $r_{ПТП}$. Распределение локальной температуры в исследуемом объекте определено формулой [2]:

$$\vartheta_{лок}(\rho, \zeta) = \frac{qr_{ПТП}}{\lambda} I(\rho, \zeta), \quad (1)$$

где $\vartheta(\rho, \zeta)$ – избыточная температура, равная разности измеренных температур в точке с координатами ρ, ζ и в невозмущенной области контролируемой поверхности,

$$I(\rho, \zeta) = \int_0^{\infty} \frac{\exp(-\zeta \cdot x) J_1(x) \cdot J_0(\rho \cdot x)}{x + Bi} \cdot dx,$$

$J_0(\rho \cdot x)$, $J_1(x)$ – функции Бесселя первого рода нулевого и первого порядков, соответственно, α – коэффициент конвективно-радиационного теплообмена поверхности образца с окружающей средой, $Bi = \alpha \cdot r_{ПТП} / \lambda$ – критерий Био, $\rho = r/r_{ПТП}$, $\zeta = z/r_{ПТП}$ – безразмерные цилиндрические координаты.

Распределение относительной избыточной температуры, рассчитанное по формуле (1), и приведенного локального теплового потока по поверхности исследуемого объекта в радиальном направлении определено кривой 1 на графике рис. 1. Как следует из приведенных графиков, на границе пятна теплового воздействия локальный тепловой поток претерпевает разрыв, и его вектор меняет направление.

Наличие контактного термического сопротивления $R_{конт}$ между зондом и поверхностью образца вносит погрешность в значение измеренной избыточной температуры, и ее расчетная формула на поверхности объекта в пределах пятна теплового воздействия следующая:

$$\vartheta(\rho, 0) = \frac{qr_{ПТП}}{\lambda} I(\rho, 0) + R_{конт} \cdot q \quad \text{при } \rho < 1). \quad (2)$$

Распределение внутри пятна теплового воздействия относительной избыточной локальной температуры, равной отношению измеренной температуры к таковой в центре пятна при отсутствии термического сопротивления, определено выражением

$$\begin{aligned} & \vartheta(\rho, 0) \Big|_{R_{конт} \neq 0} / \vartheta(0, 0) \Big|_{R_{конт} = 0} = \\ & = \left(\frac{r_{ПТП}}{\lambda} I(\rho, 0) + R_{конт} \right) / \left(\frac{r_{ПТП}}{\lambda} I(0, 0) \right). \quad (3) \end{aligned}$$

На рис. 1 (при $r/r_{ПТП} < 1$) приведены результаты расчета по этой формуле, где кривые 2-7 представляют распределение в области пятна измеренной относительной локальной температуры при вариации контактных термических сопротивлений между зондом и поверхностью образца для случая, когда преобразователь температуры (ИТ1) помещен в зоне пятна теплового воздействия. С увеличением контактного термического сопротивления значения измеренной температуры в области пятна получаются завышенными по сравнению со значениями при отсутствии термического сопротивления.

В случае размещения преобразователя температуры ИТ1 за пределами пятна воздействия (при $r/r_{ПТП} > 1$), распределение измеряемой избыточной температуры по поверхности образца при наличии контактного термического сопротивления $R_{конт}$ определено формулой

$$\vartheta(\rho, 0) = \frac{qr_{ПТП}}{\lambda} I(\rho, 0) \cdot (1 - \alpha_e \cdot R_{конт}), \quad (4)$$

где $\alpha_e = \alpha / (1 + \alpha \cdot R_{конт})$ – эффективный коэффициент конвективно-радиационного теплообмена.

При расположении измерителей температуры ИТ1 (основной) и ИТ2 (референт) так, как показано на рис. 1, расчетная формула для отношения измеряемых значений плотности локального теплового потока и избыточной температуры имеет вид:

$$\frac{q}{\vartheta} = - \frac{1 + \alpha_e \cdot R_{конт}}{\left(\frac{r_{ПТП}}{\lambda} \right) \cdot (I(\rho_1, 0) - I(\rho_2, 0))}. \quad (5)$$

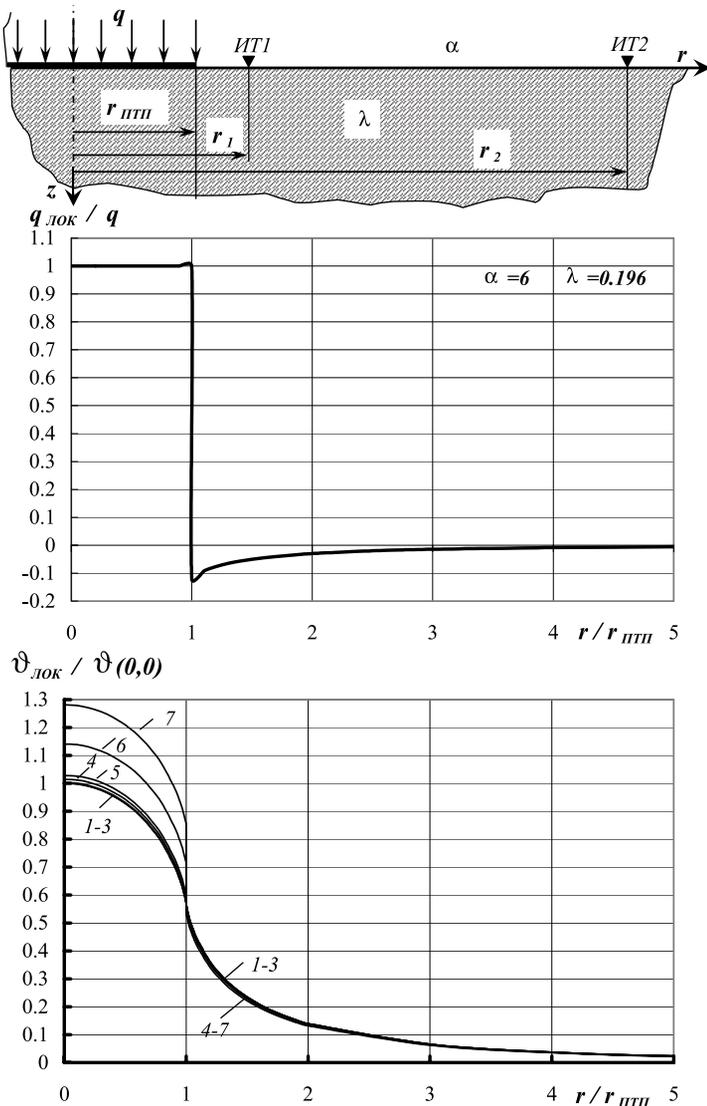


Рис. 1. Распределение приведенной плотности локального теплового потока и измеряемой относительной избыточной температуры в радиальном направлении по поверхности образца при вариации контактного термического сопротивления
 1 – $R_{\text{конт}} = 0 \text{ м}^2\text{К/Вт}$; 2 – 10^{-5} ; 3 – 10^{-4} ; 4 – $5 \cdot 10^{-4}$; 5 – 10^{-3} ; 6 – 0,005; 7 – 0,001.

На рис. 1 представлены схема измерения и графики распределения приведенной плотности локального теплового потока и измеряемой относительной избыточной температуры в радиальном направлении на поверхности образца с теплопроводностью $\lambda = 0,196 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$ при $\alpha = 6 \text{ Вт/(м}^2\text{К)}$ и вариации контактного термического сопротивления для случаев, когда измеритель температуры ИТ1 расположен в центре

пятна (область $r/r_{\text{ПТП}} < 1$) и за его пределами (область $r/r_{\text{ПТП}} > 1$).

Как следует из результатов расчета, при размещении измерителя температуры ИТ1 за пределами пятна теплового воздействия контактное термическое сопротивление практически не влияет на измерения (кривые 2-7 в области $r/r_{\text{ПТП}} > 1$), что позволяет избежать сложностей, связанных с дополнительными мерами по уменьшению контактного термического сопротивления.

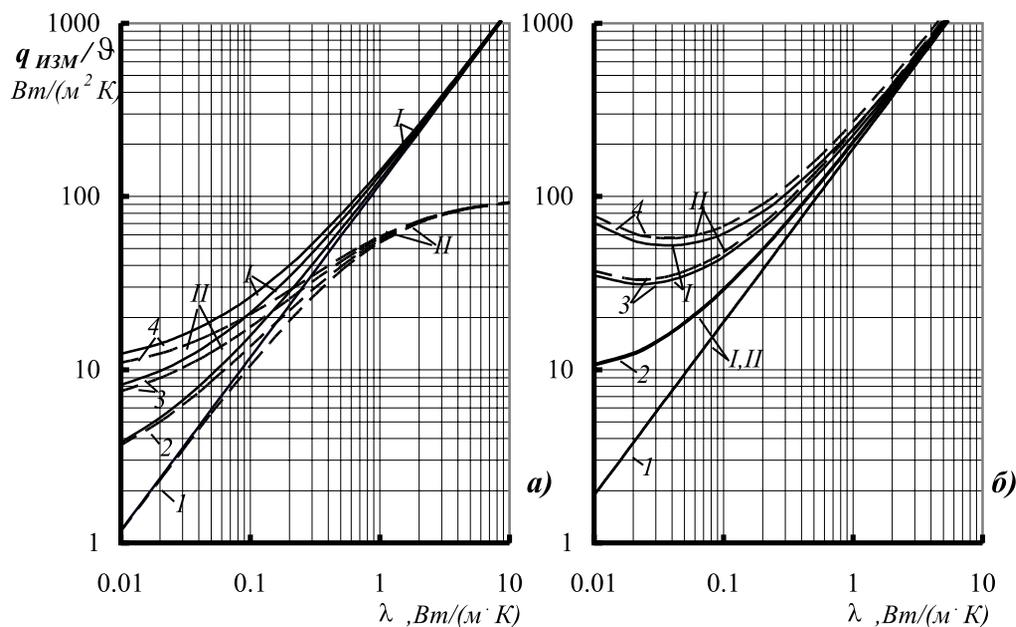
На рис.2 представлены результаты вычислений по формулам (1) и (5), определяющие степень влияния коэффициентов конвективного теплообмена и контактных термических сопротивлений на измерения для различных материалов в зависимости от того, где производятся измерения – в центре пятна а) или за его пределами б).

При измерении в центре пятна (графики а) влияние контактного термического сопротивления существенно сказывается для материалов, теплопроводность которых выше $0,1 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$, в то время как при измерении за пределами пятна (графики б) оно практически не сказывается. Степень влияния конвективного теплообмена поверхности образца с окружающей средой в обоих случаях довольно значительна для материалов с теплопроводностью ниже $0,3 \dots 0,5 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$.

Выполнен анализ характера распространения приведенной плотности локального теплового потока по поверхности образца в радиальном направлении, который показал, что ИТ-референт должен располагаться от основного пятна теплового воздействия на расстоянии не менее 5 радиусов пятна.

На рис.3 представлены графики, характеризующие степень искажения, обусловленную конвективным теплообменом, для различных значений радиуса пятна при измерениях температуры за пределами пятна.

Уменьшение радиуса теплового пятна позволяет проводить измерения без искажений даже при значениях коэффициента конвективного теплообмена $6 \text{ Вт/(м}^2\text{К)}$ – кривые 1 и 2. Для материалов, теплопроводность которых выше $0,3 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$, можно получить неискаженные результаты и для увеличенного размера пятна (кривые 3 и 4). Для материалов с меньшей теплопроводностью (к ним относятся теплоизоляторы)



I - $\alpha = 0$; 2 -2; 3 -6; 4 -10 $\text{Вт}/(\text{м}^2 \text{К})$ I - $R_{\text{конт}} = 0$; II - $0,01 \text{ м}^2 \text{К}/\text{Вт}$

Рис. 2. Зависимость отношения плотности теплового потока от теплопроводности образца в зоне теплового воздействия к измеряемой температуре, если ИТТ расположен а) в центре пятна теплового воздействия радиусом $r_{\text{ИТТ}} = 10 \text{ мм}$ и б) в точке, находящейся вне пятна и отстоящей от его центра на относительном расстоянии $r/r_{\text{ИТТ}} = 1,1$, при вариации значений коэффициента конвективного теплообмена α и контактного термического сопротивления $R_{\text{конт}}$.

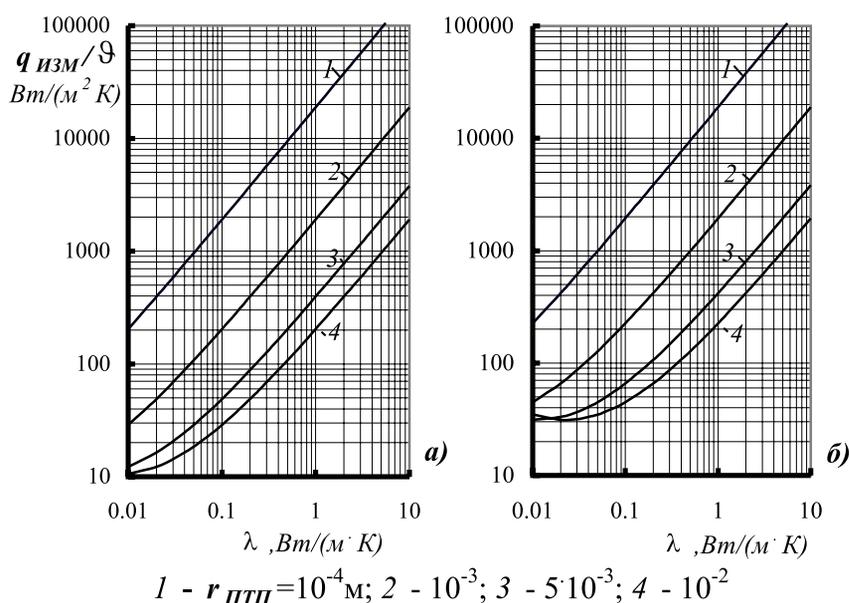


Рис. 3. Зависимость отношения измеренной плотности теплового потока к температуре, измеренной в точке $(1,1; 0)$, от теплопроводности образца при вариации радиуса пятна теплового воздействия для значений коэффициента конвективного теплообмена а) 2 и б) 6 $\text{Вт}/(\text{м}^2 \text{К})$.

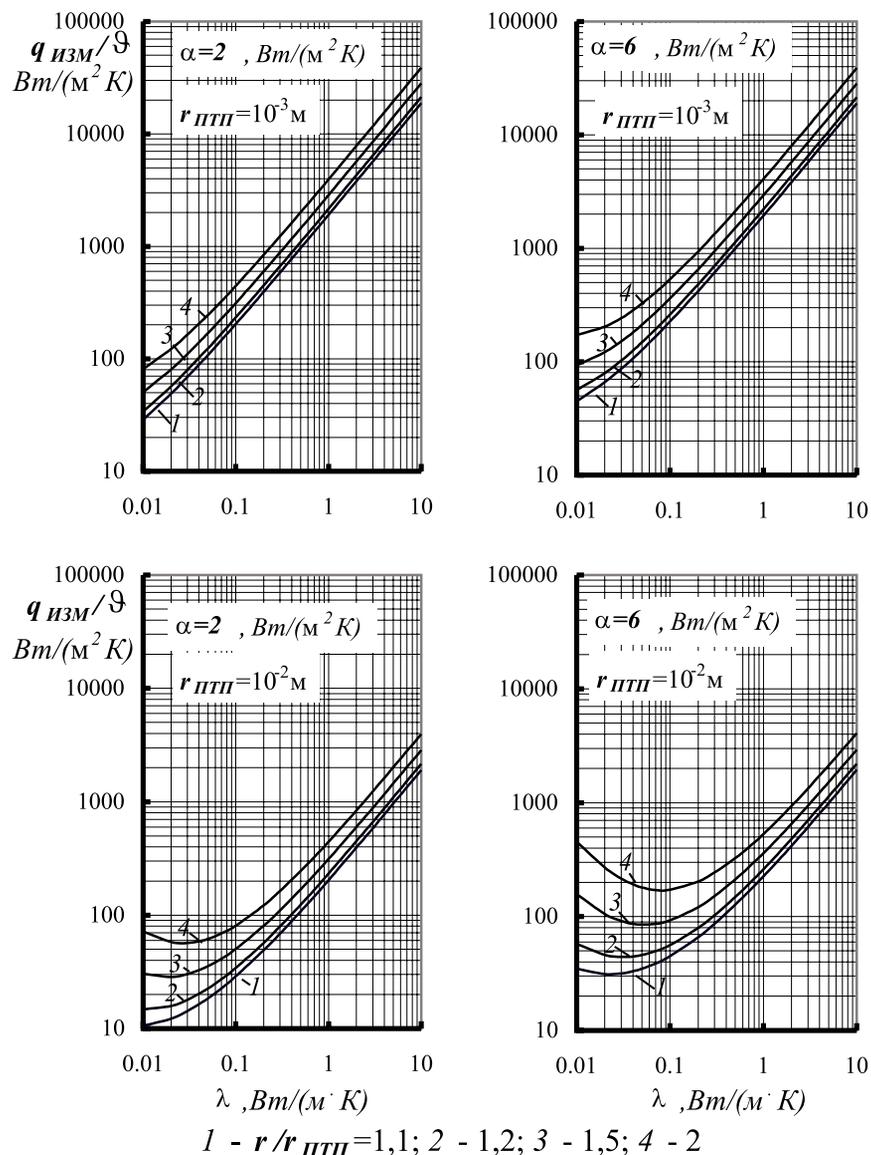


Рис. 4. Зависимость отношения измеренной плотности теплового потока к температуре от теплопроводности образца для значений радиуса пятна теплового воздействия 10^{-3} и 10^{-2} м и коэффициентов конвективного теплообмена 2 и 6 Вт/(м²К) при вариации значений относительной координаты точки измерения температуры.

необходимо предпринять дополнительные меры, а именно: либо уменьшить радиус пятна воздействия, либо уменьшить конвективный теплообмен. Первая мера не всегда возможна в случае, если структура материала пористая. Вторая мера возможна, если применить в качестве стабилизирующего средства маску из пенофола.

Определено относительное расстояние от центра пятна воздействия в радиальном направлении, где целесообразно производить измерения преобразователем температуры, чтобы избежать

больших искажений. На рис. 4 представлены результаты расчета для различных размеров пятен и коэффициентов конвективного теплообмена при вариации, отнесенных к радиусу пятна расстояний на поверхности исследуемого образца.

Как следует из приведенных графиков, для теплоизоляционных материалов можно допустить относительное расстояние равное 1,2 $r_{ПТП}$ при радиусе $r_{ПТП} = 0,01$ м и конвективном теплообмене с коэффициентом $\alpha = 2$ Вт/(м²К).

С целью определения методической погреш-

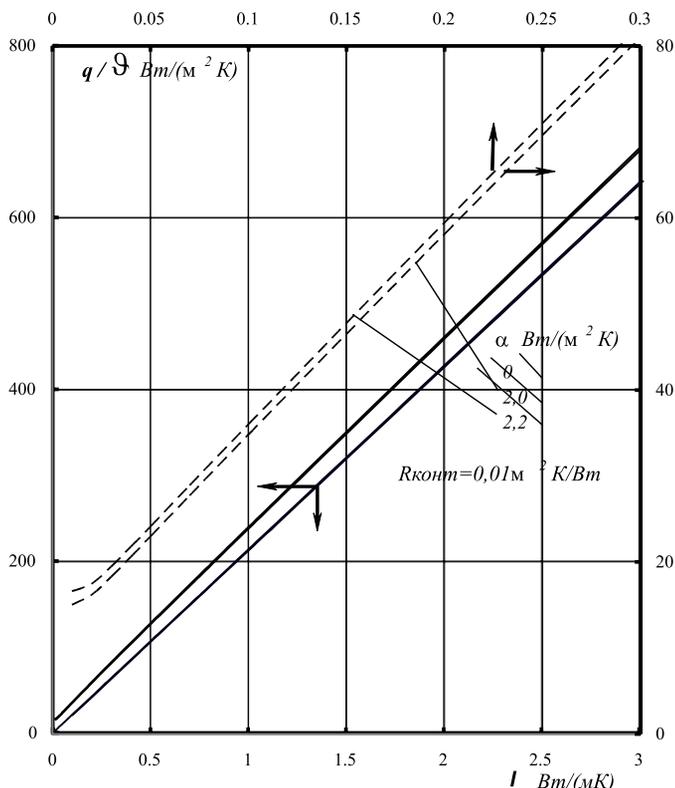


Рис.5. Определение методической погрешности при измерении на относительном расстоянии 1,2 $r_{ПТП}$ при $r_{ПТП} = 0,01$ м.

ности, связанной с отклонениями от расчетных значений коэффициентов конвективного теплообмена, проведены расчеты при максимальном значении контактного термического сопротивления $R_{конт} = 0,01 \text{ м}^2\text{К/Вт}$ и значениях $\alpha = 2$ и $2,2 \text{ Вт}/(\text{м}^2\text{К})$ при измерении на относительном расстоянии $1,2 r_{ПТП}$ для радиуса пятна $r_{ПТП} = 0,01$ м. Результаты представлены на рис. 5.

Одним из вариантов применения метода с использованием выносных ИТ может служить следующая конструкция (Рис.6). Между двумя плотно прилегающими плоскостями образцов одного и того же контролируемого материала (это могут быть, например, срезы зерна) помещен нагревательный элемент, создающий пятно теплового воздействия суммарной плотности теплового потока q . Измерители температуры ИТ1 и ИТ2, как обосновано выше, расположены за пределами пятна теплового воздействия. Такая симметричная конструкция обеспечивает отсутствие конвективного теплообмена между плоскостями образцов. Как следует из Рис.2 б), при схеме выносного размещения ИТ практически отсутствует влияние контактного термического сопротивления $R_{конт}$, что позволяет обойтись без трудоемкой подготовки поверхности образца.

Выводы

1. Для устранения влияния контактного термического сопротивления преобразователи температуры следует помещать вне зоны пятна теплового воздействия.
2. Влияние конвективного теплообмена особенно сказывается в области материалов с низкой теплопроводностью, поэтому целесообразно при работе с теплоизоляционными образцами добиваться снижения коэффициента конвективного теплообмена хотя бы до значения $2 \text{ Вт}/(\text{м}^2\text{К})$, чего можно добиться, например, с помощью защитной маски из пенофола.

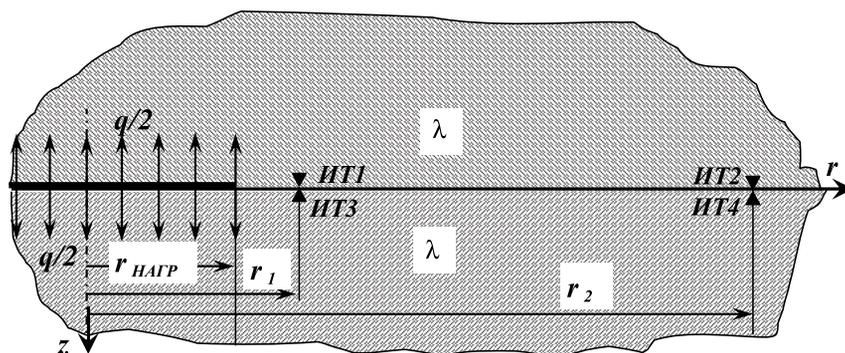


Рис.6. Вариант схемы размещения нагревателя и преобразователей температуры между плоскостями исследуемого образца для определения теплопроводности материала методом локального теплового воздействия.

3. Влияние конвективного теплообмена на измерения можно снизить также уменьшением радиуса пятна теплового воздействия до значений 10^{-4} и 10^{-3} м, допуская при этом значение коэффициента конвективного теплообмена до $6 \text{ Вт}/(\text{м}^2\text{К})$. Там, где нельзя применить пятно с вышеупомянутыми значениями радиуса (например, для пористых материалов), необходимо добиваться уменьшения коэффициента конвективного теплообмена при радиусе пятна $0,01$ м.

4. Отношение расстояния на поверхности образца от центра пятна до места размещения преобразователя температуры к радиусу пятна, влияет на показания измерений, что связано с условиями конвективного теплообмена, свойствами материала и площадью пятна теплового воздействия.

5. Исходя из результатов расчета, а также требований к свойствам теплоизоляционных строительных материалов, рекомендованы следующие оптимальные параметры прибора с выносными преобразователями температуры: радиус пятна теплового воздействия $0,01$ м, относительное расстояние, на котором помещен преобразователь температуры, равен $1,1$ (или в абсолютном значении при данном радиусе пятна $0,011$ м от центра пятна). Коэффициент конвективного теплообмена должен поддерживаться на уровне $2 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \text{ К})$.

6. Использование схемы размещения нагревателя и преобразователей температуры между прилегающими плоскостями полубесконечных массивов позволяет минимизировать влияние таких величин, как коэффициент конвективного теплообмена и контактное термическое сопротивление.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кулаков М.В., Макаров Б.И. Измерение температуры поверхности твердых тел/Библиотека по автоматике. – Вып. 598. – М.: Энергия, 1979. – 96 с.
2. Декуша Л.В., Грищенко Т.Г., Менделеева Т.В, Воробьев Л.И., Декуша О.Л. Теоретическое обоснование прибора для экспресс-определения коэффициентов тепло-проводности твердых материалов//Пром.теплотехника. – 2004. – Т.26. – № 4. – С. 76–82.
3. Декуша О.Л. Прибор для экспресс-измерений коэффициента теплопроводности строительных материалов (ИТ-8)//Пром.теплотехника. – 2004. – Т.26. – № 6. – С. 212–216.
4. Декуша Л.В., Воробьев Л.И., Менделеева Т.В, Декуша О.Л. Особенности экспресс-измерения теплопроводности на образце конечной толщины прибором ИТ-8 //Пром.теплотехника. – 2004. – Т.26. – № 5. – С. 76–81.
5. Декуша Л.В., Воробьев Л.И., Менделеева Т.В, Декуша О.Л. Теплотрический метод экспресс-определения теплопроводности строительных материалов //“Проблемы экологии и эксплуатации объектов энергетики” Сборник трудов XIV конференции стран СНГ с международным участием. Севастополь. – 2004 г., с. 163–166.
6. Декуша Л.В., Грищенко Т.Г., Менделеева Т.В, Воробьев Л.И., Декуша О.Л. Влияние определяющих факторов на результаты измерения коэффициентов теплопроводности методом локального теплового воздействия //Пром.теплотехника. – 2005. – Т.27. – № 3. – С.74–80.

Получено 23.08.2005 г.