

УДК 536.2:536.3:536.6:629.7:697.34

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

Ин-т технической теплофизики НАН Украины

ОСОБЕННОСТИ ЭКСПРЕСС-ИЗМЕРЕНИЯ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ НА ОБРАЗЦЕ КОНЕЧНОЙ ТОЛЩИНЫ ПРИБОРОМ ИТ-8

Подано теоретичні обґрунтування та практичні рекомендації щодо коригування показань приладу ИТ-8. При експрес-визначенні коефіцієнту теплопровідності на зразку невеликої товщини принцип дії приладу базується на методі локального теплового діяння.

Даны теоретические обоснования и практические рекомендации по корректировке показаний прибора ИТ-8. При экспресс-определении коэффициента теплопроводности на образце небольшой толщины принцип действия прибора основан на методе локального теплового воздействия.

Theoretical substantiations and practical recommendations on updating device ИТ-8 readings, based on the local thermal influence method are given, at express train-definition of heat conductivity coefficient on a sample of small thickness.

$Bi_i = \alpha_i \cdot r_{ПТП} / \lambda$ – число Био, $i = 1, 2$;

h – толщина;

J_0, J_1 – функции Бесселя первого рода нулевого и первого порядка;

q – плотность потока теплового воздействия;

r и z – цилиндрические координаты;

$r_{П}$ – радиус пятна теплового воздействия;

T – температура;

α – коэффициент теплообмена;

k – поправочный коэффициент;

λ – коэффициент теплопроводности;

$\vartheta(\rho, \zeta) = T(\rho, \zeta) - T_{OC}$ – избыточная температура;

$\rho = r/r_{ПТП}$, $\zeta = z/r_{ПТП}$ – безразмерные координаты.

Индексы:

ИЗМ – измеренная величина;

ЛОК – локальный;

М – материал;

ОБР – образец;

ОС – окружающая среда;

П – пятно;

ПБ – полубесконечный;

ПЛ – пластина;

ПТП – преобразователь теплового потока.

Наряду с тепловыми испытаниями образцов строительных материалов в стационарных лабораторных условиях часто возникает необходимость в проведении экспрессных измерений коэффициента теплопроводности строительных материалов и изделий в производственных условиях: либо в цеху предприятия-изготовителя, либо на стройплощадке. Проведение таких экспресс-измерений, отвечающих стандартам и нормативным документам [1-3], обеспечивает возможность контроля кондиционности выпускаемых материалов и изделий прямо на объекте.

Для этих целей в ИТТФ НАНУ [4] разработан переносной прибор для определения коэффициентов теплопроводности строительных материалов модели ИТ-8. Принцип действия прибора основан

на использовании метода локального теплового воздействия [5]. Согласно этому методу через небольшое пятно в форме круга радиусом $r_{П}$ к плоской поверхности образца с помощью нагревателя подводят тепловой поток плотности q . Расположенным под нагревателем преобразователем теплового потока с радиусом $r_{ПТП}$ измеряется среднее по пятну значение плотности теплового потока. Под преобразователем теплового потока помещена температуровыравнивающая пластина, а в нее вмонтирован спай термопары, с помощью которой измеряется средняя по пятну температура T .

Градуировка прибора проводится на образцах из материала с известной теплопроводностью.

Толщина образца при градуировке выбирается значительно больше по радиуса пятна теплового воздействия так, чтобы образец можно было интерпретировать как полубесконечный массив. При градуировке устанавливается соответствие между значением сигнала прибора и значением коэффициента теплопроводности, определенным с помощью аппроксимирующей функции $\lambda = f(q/T)$, которая вносится в память электронного блока.

В реальных условиях определения коэффициентов теплопроводности строительных материалов и изделий испытываемый образец, как правило, представляет собой пластину конечной толщины, которая к тому же помещается в среду с температурой T_{OC} . При этом конвективный теплообмен с окружающей средой происходит по обе стороны пластины с различными в общем случае коэффициентами теплообмена α_1 и α_2 .

Следовательно, необходимо определить условия, при которых можно сопоставить значения $q_{ПЛ}/\vartheta_{ПЛ}$, полученные при измерении на пластине, и значения $q_{ПБ}/\vartheta_{ПБ}$, которые были бы получены при измерении на полубесконечном массиве. Очевидно, при постоянном радиусе пятна эти условия должны зависеть от толщины пластины $h_{ПЛ}$ и коэффициентов теплообмена α_1 и α_2 .

Учитывая малость площади пятна по сравнению с площадью пластины, пластину можно принять бесконечной. Схема теплообмена в цилиндрической системе координат представлена на рис. 1.

Распределение локальной избыточной температуры $\vartheta(\rho, \zeta)$ в пластине конечной толщины с учетом искажения, вносимого преобразователем теплового потока, в безразмерных цилиндрических координатах определяется соотношением [6]

$$\vartheta_{ЛОК ПЛ}(\rho, \zeta) = \frac{q_{ПЛ} \cdot r_{ПТП}}{\lambda_{ОБР}} \cdot S(\rho, \zeta), \quad (1)$$

где

$$S(\rho, \zeta) = \int_0^{\infty} \frac{A(\zeta, x) + B(\zeta, x)}{C(\zeta, x) - D(\zeta, x)} \cdot J_1(x) \cdot J_0(\rho \cdot x) dx, \quad (2)$$

$$A(\zeta, x) = (x + Bi_2) \exp((k_h - \zeta)x);$$

$$B(\zeta, x) = (x - Bi_2) \exp(-(k_h - \zeta)x);$$

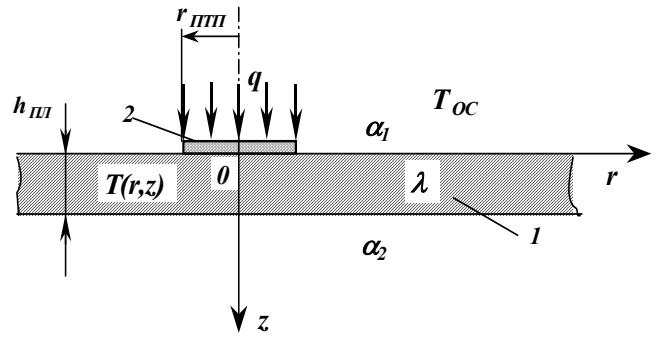


Рис. 1. Модель теплообмена в системе «ПТП–бесконечная пластина»: 1 – пластина; 2 – ПТП.

$$C(\zeta, x) = (x + Bi_1) \cdot (x + Bi_2) \exp(k_h \cdot x);$$

$$D(\zeta, x) = (x - Bi_1) \cdot (x - Bi_2) \exp(-k_h \cdot x).$$

Как было отмечено выше, измеряется средняя по площади теплового пятна температура. Выражение для среднеинтегральной температуры получим путем интегрирования (1) по всей площади пятна ($\rho = 1$):

$$\vartheta_{ПЛ}(\zeta) = \frac{q_{ПЛ} \cdot r_{ПТП}}{\lambda} \cdot S_{SR}(\zeta), \quad (3)$$

где

$$S_{SR}(\zeta) = \int_0^{\infty} \frac{A(\zeta, x) + B(\zeta, x)}{C(\zeta, x) - D(\zeta, x)} \cdot J_1(x) \cdot \frac{2J_1(x)}{x} dx. \quad (4)$$

Поскольку измерение производится на поверхности образца ($\zeta = 0$), формула для вычисления теплопроводности материала по измерениям на плоской пластине на основании (3) следующая:

$$\lambda_{ОБР} = \frac{q_{ПЛ} \cdot r_{ПТП}}{\vartheta_{ПЛ}(0)} \cdot S_{SR}(0). \quad (5)$$

Определим подобное выражение для образца из того же материала, когда образец представляет полубесконечный массив и диаметр теплового пятна остается неизменным.

Распределение локальной избыточной температуры в полубесконечном массиве с учетом искажения, вносимого ПТП, определяется формулой [6]

$$\vartheta_{ЛОК ПБ}(\rho, \zeta) = \frac{q_{ПБ} \cdot r_{ПТП}}{\lambda_{ОБР}} \cdot I(\rho, \zeta), \quad (6)$$

где

$$I(\rho, \zeta) = \int_0^{\infty} \frac{\exp(-\zeta \cdot x)}{x + \text{Bi}_1} \cdot J_1(x) \cdot J_0(\rho \cdot x) dx. \quad (7)$$

По аналогии с пластиной конечной толщины выражение для распределения среднеинтегральной температуры имеет вид

$$\vartheta_{\text{ПБ}}(\zeta) = \frac{q_{\text{ПБ}} \cdot r_{\text{ПТП}}}{\lambda} \cdot I_{\text{SR}}(\zeta), \quad (8)$$

где

$$I_{\text{SR}}(\zeta) = \int_0^{\infty} \frac{\exp(-\zeta \cdot x)}{x + \text{Bi}_1} \cdot J_1(x) \cdot \frac{2J_1(x)}{x} dx. \quad (9)$$

Формула для вычисления теплопроводности материала по измерениям на поверхности $\zeta = 0$ образца, представляющего полубесконечный массив, исходя из (8) следующая:

$$\lambda_{\text{ОБР}} = \frac{q_{\text{ПБ}} \cdot r_{\text{ПТП}}}{\vartheta_{\text{ПБ}}(0)} \cdot I_{\text{SR}}(0). \quad (10)$$

Поскольку материал один и тот же, коэффициенты теплопроводности в (5) и (10) равны, откуда, приравняв их правые части, получим

$$\frac{q_{\text{ПБ}} \cdot r_{\text{ПТП}}}{\vartheta_{\text{ПБ}}(0)} \cdot I_{\text{SR}}(0) = \frac{q_{\text{ПЛ}} \cdot r_{\text{ПТП}}}{\vartheta_{\text{ПЛ}}(0)} \cdot S_{\text{SR}}(0). \quad (11)$$

На основании этого равенства запишем выражение для сопоставления сигналов, полученных для полубесконечного массива и пластины конечной толщины

$$\frac{q_{\text{ПБ}}}{\vartheta_{\text{ПБ}}} = \frac{q_{\text{ПЛ}}}{\vartheta_{\text{ПЛ}}} \cdot \frac{S_{\text{SR}}(0)}{I_{\text{SR}}(0)} = \frac{q_{\text{ПЛ}}}{\vartheta_{\text{ПЛ}}} \cdot \kappa. \quad (12)$$

Величина $\kappa = \frac{S_{\text{SR}}(0)}{I_{\text{SR}}(0)}$ представляет собой поправочный коэффициент, с помощью которого можно перейти от показаний, полученных измерением на пластине, к идеализированным. Как следует из (4) и (9), $\kappa = \kappa(h_{\text{ПЛ}}/r_{\text{ПТП}}, \alpha_1, \alpha_2, \lambda)$, то есть поправочный коэффициент зависит от условий теплообмена на обеих сторонах пластины, ее относительной толщины и коэффициента теплопроводности материала.

Определим количественное влияние каждого из этих параметров на показания прибора ИТ-8. Определим также условия, при которых обеспечивается значение поправочного коэффициента $\kappa = 1$, то есть условия, при которых измерения на пла-

стине с достаточной степенью приближения отвечают идеализированному случаю.

Условия эксплуатации прибора ИТ-8 таковы, что коэффициент теплообмена на плоскости установки ПТП $\alpha_1 = 6 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$, радиус ПТП $r_{\text{ПТП}} = 10 \text{ мм}$. На рис. 2 представлены результаты расчета показаний для двух предельных вариантов теплообмена на второй плоскости, а именно, $\alpha_2 = 0$ и $10^3 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ при вариации относительной толщины пластины. Первый вариант соответствует условиям, когда вторая плоскость теплоизолирована, а второй – когда она расположена на теплообменнике с интенсивным отбором теплоты, которым может служить, например, плита из высокотеплопроводного металла, обдуваемая сильно турбулизированным потоком.

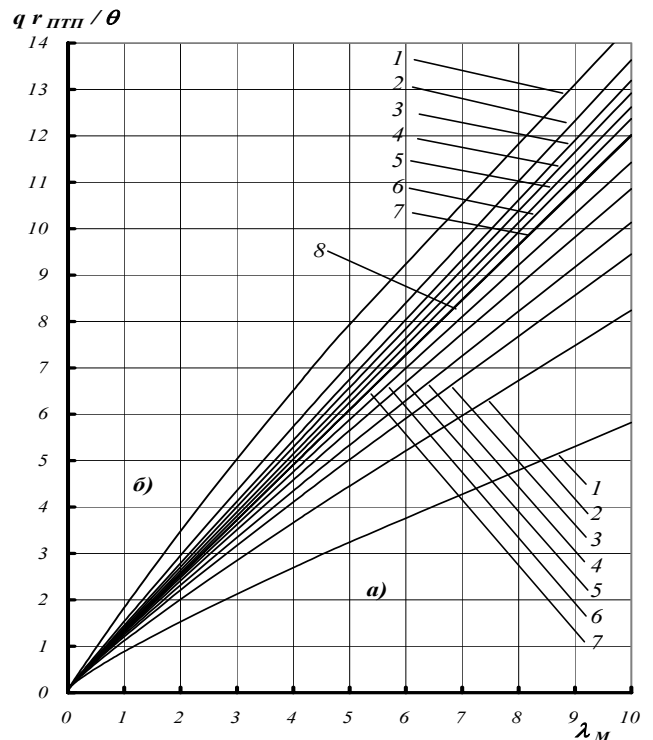


Рис. 2. Значение комплекса измеряемых величин $q r_{\text{ПТП}}/q$, полученных измерением ПТП радиусом 10 мм на пластине при $\alpha_1 = 6 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ и различных условиях теплообмена на другой стороне пластины при вариации ее относительной толщины. а) $\alpha_2 = 0 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$; б) 10^3 .

1 – $h_{\text{ПЛ}}/r_{\text{ПТП}} = 1$; 2 – 2; 3 – 3; 4 – 4; 5 – 6; 6 – 8; 7 – 10; 8 – полубесконечный массив.

Как следует из графиков, отклонение значений $qr_{ПТП}/\theta$ от идеализированных при измерениях на пластине происходит в сторону уменьшения, когда пластина помещена на металлическую плиту ($\alpha_2 = 10^3 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$), и в сторону увеличения, когда теплоизолирована вторая плоскость ($\alpha_2 = 0 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$). В первом варианте прибор будет показывать завышенные, а во втором заниженные значения коэффициентов теплопроводности по сравнению с истинными.

Следовательно, при прочих равных условиях существует режим конвективного теплообмена на второй плоскости с таким значением коэффи-

ента теплообмена α_2 в диапазоне $[0 \dots 10^3]$, при котором показания на пластине практически не отличаются от идеализированных.

Возможно также использование линейной комбинации решений с разнонаправленными отклонениями от идеализированных условий. Приме-

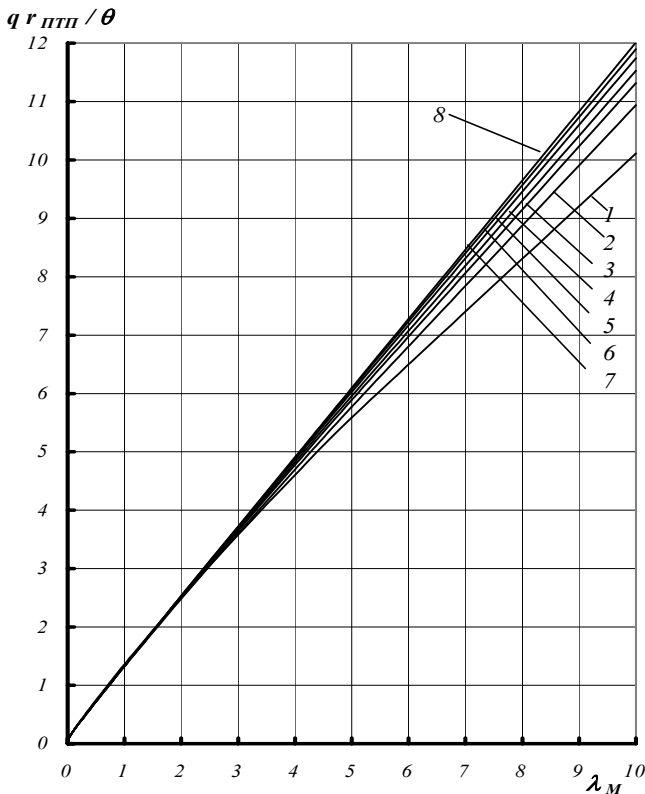


Рис. 3. Значение комплекса $qr_{ПТП}/q$, полученное как среднее арифметическое от измерений ПТП радиусом 10 мм при двух предельных условиях конвективного теплообмена ($\alpha_2 = 0$ и $10^3 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$) и вариации относительной толщины на пластине при $\alpha_1 = 6 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$.

- 1 – $h_{ПЛ}/r_{ПТП} = 1$; 2 – 2; 3 – 3; 4 – 4; 5 – 6; 6 – 8;
- 7 – 10; 8 – полубесконечный массив.

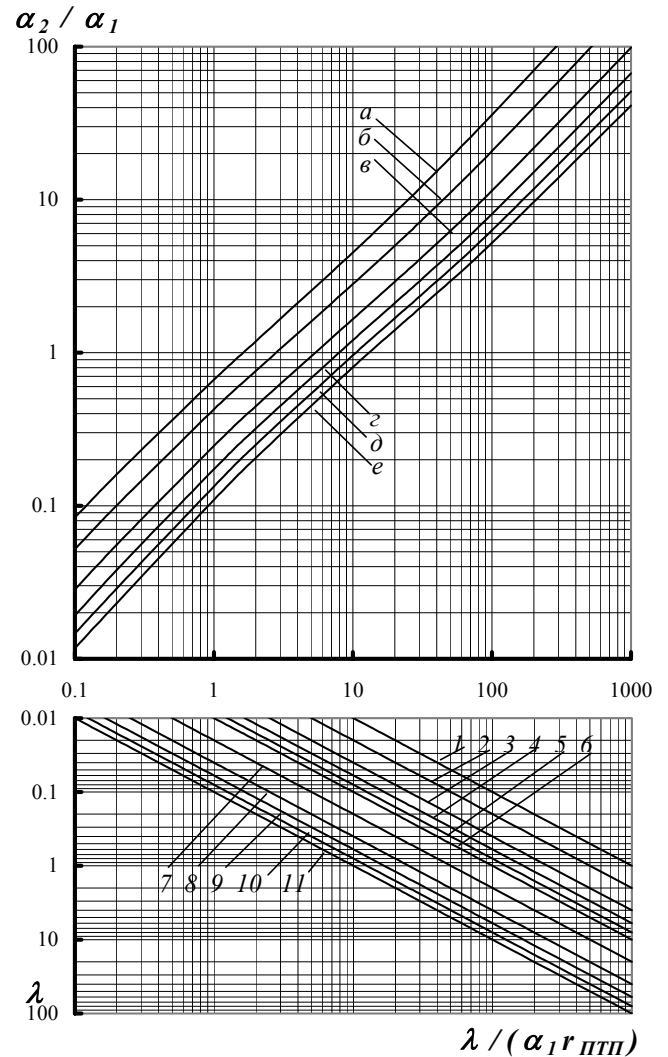


Рис. 4. Номограмма для нахождения значений отношения коэффициентов теплообмена α_2/α_1 , которое необходимо обеспечить для материалов различной теплопроводности, чтобы получить значение поправочного коэффициента $\kappa = 1$ при вариации относительной толщины пластины. а – $h_{ПЛ}/r_{ПТП} = 1$; б – 2; в – 4; г – 6; д – 8; е – 10. 1 – $\alpha_1 \cdot r_{ПТП} = 0,001$; 2 – 0,002; 3 – 0,004; 4 – 0,006; 5 – 0,008; 6 – 0,01; 7 – 0,02; 8 – 0,04; 9 – 0,06; 10 – 0,08; 11 – 0,1.

ром последнего могут служить результаты, представленные на рис. 3, соответствующие среднему арифметическому результатов, полученных для предельных вариантов, представленных на рис. 2. Даже такой сравнительно простой прием позволяет пользоваться без поправок измерениями, проводимыми на пластине для материалов, теплопроводность которых находится в диапазоне от 0,03 до 2,5 Вт/(м·К). Этот диапазон включает основные материалы, используемые в строительстве.

На рис. 4 представлена номограмма для определения отношения коэффициентов теплообмена α_2/α_1 , при котором поправочный коэффициент $\kappa = 1$. Относительная толщина $h_{ПЛ}/r_{ПТП}$ варьировалась от 1 до 10.

Результаты, приведенные в номограмме, получены решением уравнения

$$\kappa(h_{ПЛ}/r_{ПТП}, Bi_1, \alpha_2/\alpha_1, \lambda) - 1 = 0, \quad (13)$$

где поправочный коэффициент κ определен как функция формулами (4), (9) и (12).

Таким образом, при обеспечении режимов теплообмена, определенных по номограмме для конкретного ПТП и относительной толщины пластины, показания прибора, полученные на пластине конечной толщины, не требуют корректировки.

Если создать такие условия трудно, можно воспользоваться системой поправок, примеры которых приведены на рис. 5, где представлены поправочные коэффициенты κ для прибора ИТ-8 в условиях конвективного теплообмена при $\alpha_2 = \alpha_1 = 6 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$.

Действительное значение коэффициента теп-

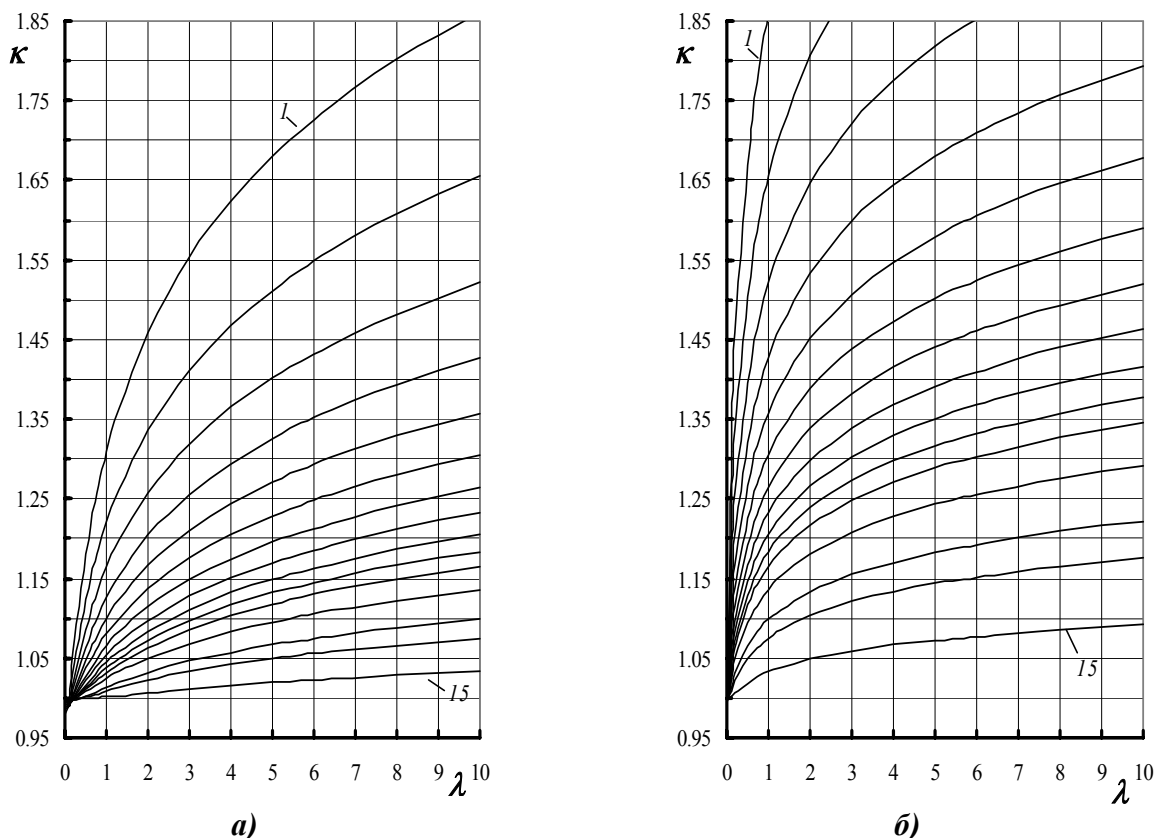


Рис. 5. Значение поправочного коэффициента, полученного измерением ПТП радиусом. а) 10 мм и б) 1 мм на пластине при вариации относительной толщины. $\alpha_2 = \alpha_1 = 6 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$.

1 – $h_{ПЛ}/r_{ПТП} = 1$; 2 – 1,25; 3 – 1,5; 4 – 1,75; 5 – 2; 6 – 2,25; 7 – 2,5; 8 – 2,75;
9 – 3; 10 – 3,25; 11 – 3,5; 12 – 4; 13 – 5; 14 – 6; 15 – 10.

теплопроводности материала $\lambda_{\text{ОБР}}$ определяют по формуле

$$\lambda_{\text{ОБР}} = \kappa \cdot \lambda_{\text{ИЗМ}} \quad (14)$$

Значения поправочного коэффициента определяются по графикам, приведенным на рис. 5.

Выводы

1. Прибор ИТ-8 пригоден для экспресс-определения теплопроводности материалов на образцах как большой, так и малой толщины.

2. При измерении на тонком образце следует предпринять определенные меры, так как при этом могут быть получены заниженные или завышенные значения коэффициента теплопроводности.

3. Для диапазона значений коэффициентов теплопроводности строительных материалов достаточно точные результаты дает среднее арифметическое значений, полученных для предельных случаев, которые сравнительно легко обеспечить теплоизоляцией и металлической пластиной.

4. Неискаженные значения коэффициентов теплопроводности можно получить, обеспечив для конкретного образца согласованные режимы конвективного теплообмена, определяемые предложенной номограммой.

5. В случае невозможности обеспечения необходимых режимов теплообмена измеренное значение коэффициента теплопроводности необходимо умножить на поправочный коэффициент, который зависит от относительной толщины исследуемого образца, диаметра пятна теплового

воздействия и коэффициентов теплообмена по обе стороны плоского образца.

ЛИТЕРАТУРА

1. Межгосударственный стандарт ГОСТ 7076-99. Материалы строительные. Метод определения теплопроводности и термического сопротивления при стационарном тепловом режиме.
2. Международный стандарт ИСО 8301:1991. Теплоизоляция. Определение термического сопротивления и связанных с ним теплофизических показателей при стационарном тепловом режиме. Прибор, оснащенный тепломером.
3. Межгосударственный стандарт ГОСТ 30290-94 (ДСТУ Б В.2.7.-41-95). Материалы и изделия строительные. Метод определения теплопроводности поверхностным преобразователем.
4. Теоретичні основи розрахунків та проектування установок для визначення теплопровідності / Звіт про НДР (заключний). Шифр 1.7.1.570 („ЛАМБДА”) № Держреєстрації 0101 U 002314.– Київ: Інститут технічної теплофізики НАН України.– 2003.– 115 с.
5. Пехович А.И., Жидких В.М. Расчеты теплового режима твердых тел.– Л.: Энергия, 1976.– 352 с., ил.
6. Кулаков М.В., Макаров Б.И. Измерение температуры поверхности твердых тел / Библиотека по автоматике.– Вып. 598.– М.: Энергия, 1979.– 96 с., ил.

Получено 21.06.2004 г.