

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

ТЕПЛОМЕТРИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ТВЕРДЫХ И СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ

Вивчено можливість використання виключно теплострумів вимірювань при реалізації методу локальної теплової дії для визначення теплопровідності широкого класу матеріалів. Запропоновано три варіанти конструктивного виконання теплометричних голівок, що базуються на існуючих і перспективних технологіях сучасної теплометрії. Принциповою перевагою запропонованих конструкцій є зниження вимог до чистоти обробки поверхонь досліджуваного матеріалу та до стабілізації і зменшення контактної опору.

Изучена возможность использования исключительно теплостручных измерений при реализации метода локального теплового воздействия для определения теплопроводности широкого класса материалов. Предложены три варианта конструктивного исполнения теплометрических головок, основанных на существующих и перспективных технологиях современной теплометрии. Принципиальным преимуществом предложенных конструкций является снижение требований к чистоте обработки поверхностей исследуемого материала и к стабилизации контактных сопротивлений.

The possibility of use exclusively heat flux measurements is studied at realization of a local thermal action method (probe method) for definition of heat conductivity of a wide class of materials. Three variants of a design the measuring heads based on existing and perspective technologies modern thermometry are offered. Basic advantage of the offered designs is decrease in requirements to cleanliness of processing of surfaces of an investigated material and reduction of requirements to stabilization of contact resistance.

$Bi = \alpha \cdot r_{ПТП} / \lambda$ – число Био;

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

q – плотность теплового потока;

r, x – цилиндрические переменные;

R – термическое сопротивление;

z – переменная интегрирования;

α – коэффициент теплообмена;

λ – коэффициент теплопроводности;

$\vartheta(\rho, \zeta)$ – избыточная температура.

Индексы:

ε – радиационный;

ВНУТР – внутренний;

ИЗМ – измеренная величина;

КОНТ – контактный;

ЛОК – локальный;

НАР – наружный;

ПТП – преобразователь теплового потока;

П – пятно теплового воздействия;

СР – среднеинтегральный;

Т – термобатарея;

ЭФ – эффективный;

1 и 2 – входящий и рассеиваемый (тепловые потоки).

Для определения коэффициента теплопроводности твердых материалов методом локального теплового воздействия [1] с помощью поверхностного накладного зонда необходимо знать измеренные значения двух величин, а именно, плотности теплового потока и разности температур в зоне пятна теплового воздействия и на периферии поверхности образца. На результаты измерения коэффициентов теплопроводности этим ме-

тодом оказывают влияние различные факторы, рассмотренные ранее в работах [2–7].

При наличии теплообмена полуограниченного массива с окружающей средой при воздействии на часть поверхности локальным тепловым потоком распределение потерь вокруг пятна воздействия зависит от теплопроводности образца, геометрических размеров пятна и коэффициента теплообмена [2]. При фиксированных размерах

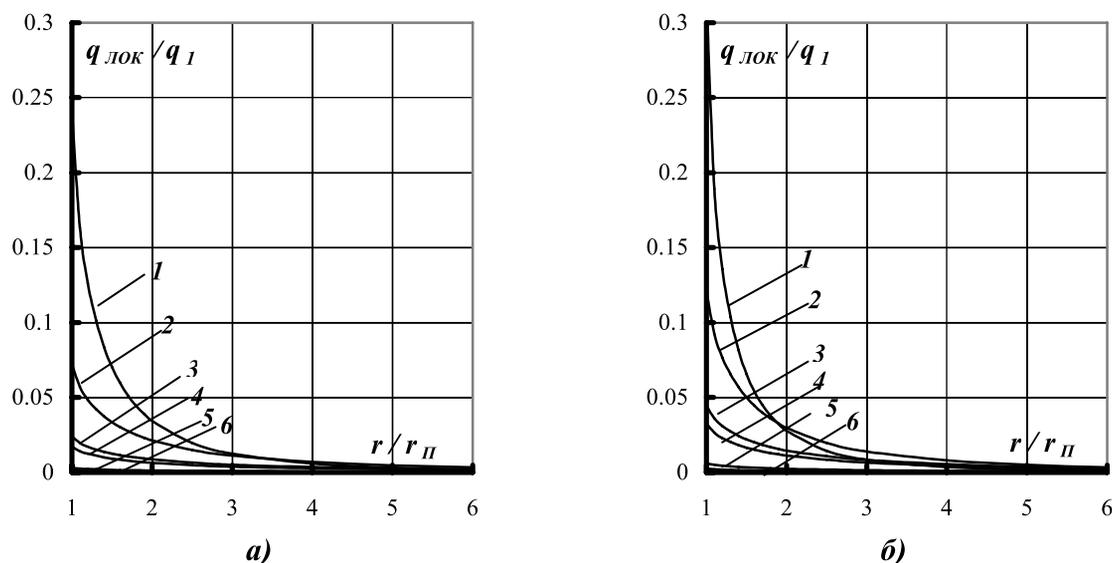


Рис. 1. Распределение относительного локального теплового потока по радиусу на поверхности образца при вариации коэффициентов теплопроводности исследуемого материала при значении диаметра пятна теплового воздействия 0,02 м. а) – $\alpha_{эф} = 3 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \text{ К})$, б) – 6. 1 – $\lambda = 0,03 \text{ Вт}/(\text{м К})$; 2 – 0,196; 3 – 0,699; 4 – 1; 5 – 6; 6 – 15.

пятна теплового воздействия и стабилизированных условиях теплообмена наблюдается устойчивая взаимосвязь между приведенными к поступающему тепловому потоку теплотерями и теплопроводностью материала (Рис. 1). Это позволило сделать вывод о возможности создания приборов для измерения теплопроводности однородных материалов, в которых измерение разности температур заменено теплоточными измерениями.

Рассмотрим три варианта выполнения теплотметрической головки с измерением среднеинтегрального по кольцевой поверхности теплового потока (вариант А), по окружности, находящейся на некотором расстоянии от пятна воздействия (вариант Б), и по радиусу (вариант В).

В варианте А теплотметрическая измерительная головка (рис.2, а), состоит из центрального преобразователя теплового потока (ПТП) 1, измеряющего плотность входящего теплового потока q_1 и снабженного пленочным нагревателем, и ПТП 2, окружающего по кольцу ПТП 1 и измеряющего плотность теплового потока q_2 , рассеиваемого образцом в окружающую среду.

Среднеинтегральная по площади кольца плотность теплового потока на поверхности образца вне зоны пятна теплового воздействия связана со

среднеинтегральной температурой соотношением $q_2 = \alpha_{эф} \vartheta_{ср}$. Для определения $\vartheta_{ср}$ воспользуемся известной формулой [1] для локальных температур:

$$\vartheta_{лок}(\zeta, \rho) = \frac{q_1 r_{II}}{\lambda} \int_0^{\infty} \frac{\exp(-\zeta z) J_1(z) J_0(\rho z)}{z + \text{Bi}} dz, \quad (1)$$

где $\rho = r/r_{II}$ и $\zeta = x/r_{II}$ – безразмерные цилиндрические координаты, $\text{Bi} = \alpha_{эф} r_{II} / \lambda$ – число Био, $\alpha_{эф} = \left(1/(\alpha_k + \alpha_\varepsilon) + R_{ПТП2} + R_{КОНТ} \right)^{-1}$ – эффективный коэффициент теплообмена плоскости образца с окружающей средой.

Воспользовавшись формулой (1), получим выражение для среднеинтегральной по площади F поверхности образца избыточной температуры $\vartheta_{ср}$ как функцию от текущего наружного радиуса кольца при фиксированном внутреннем радиусе:

$$\begin{aligned} \vartheta_{ср}(0, \rho_{НАР}) &= \frac{1}{F} \int_F \vartheta_{лок}(0, \rho) dF = \\ &= \frac{1}{\pi(\rho_{НАР}^2 - \rho_{ВНУТР}^2)} \int_{\rho_{ВНУТР}}^{\rho_{НАР}} \vartheta_{лок}(0, \rho) 2\pi r d\rho = \end{aligned}$$

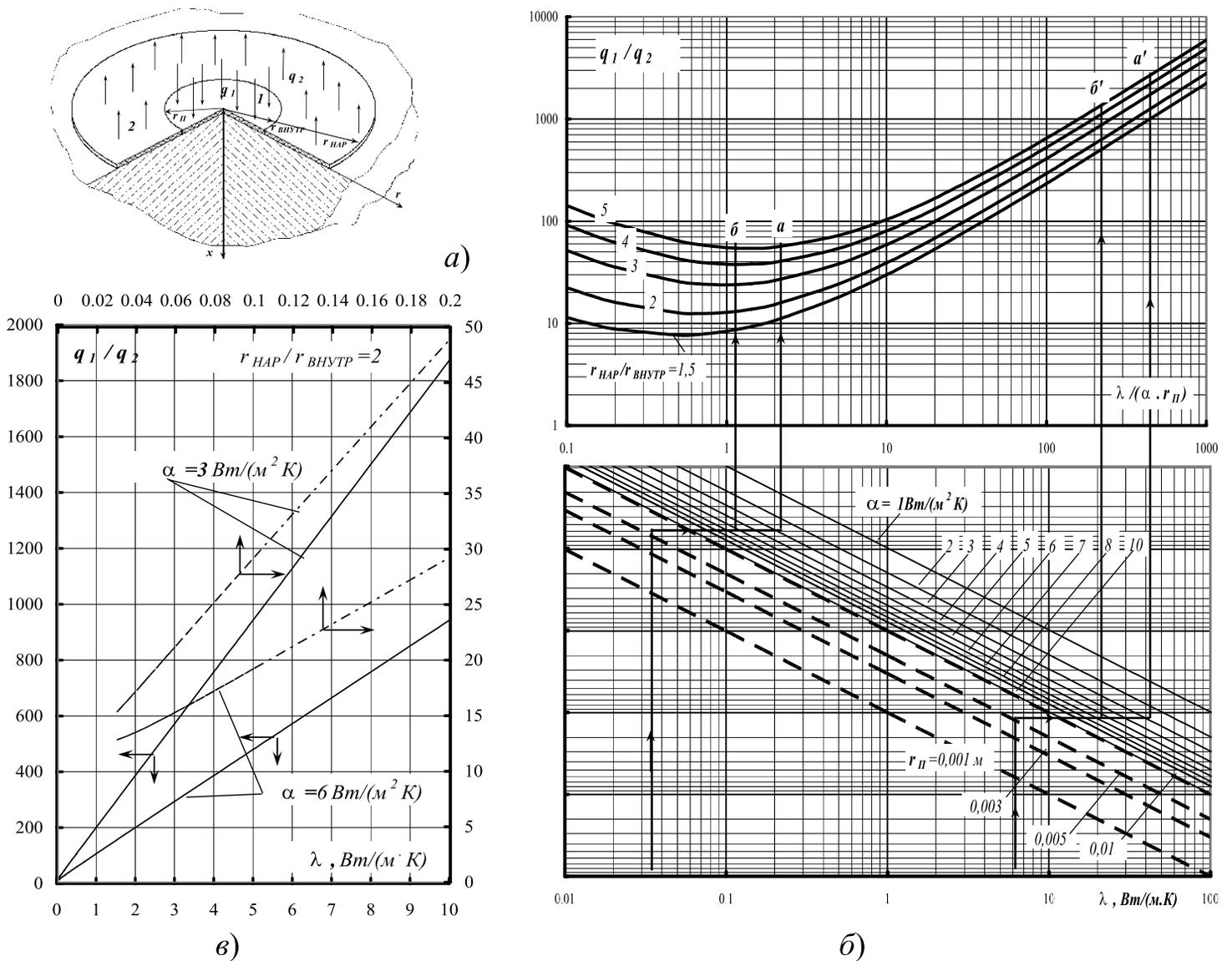


Рис. 2. Вариант А. а) схема размещения нагревателя и кольцевого преобразователя теплового потока на плоскости исследуемого образца; б) номограмма для выбора определяющих параметров на стадии конструирования прибора с целью обеспечения его достаточной чувствительности; в) графики для определения коэффициента теплопроводности по значению отношения плотности подводимого теплового потока к плотности рассеиваемого.

$$= \frac{2}{\rho_{\text{НАР}}^2 - \rho_{\text{ВНУТР}}^2} \int_{\rho_{\text{ВНУТР}}}^{\rho_{\text{НАР}}} \frac{q_1 r_{\text{П}}}{\lambda} \int_0^{\infty} \frac{\exp(-\zeta z) J_1(z) J_0(\rho z)}{z + \text{Bi}} dz \rho d\rho, (2)$$

где $\rho_{\text{НАР}} = r_{\text{НАР}}/r_{\text{П}}$ и $\rho_{\text{ВНУТР}} = r_{\text{ВНУТР}}/r_{\text{П}}$ – безразмерные наружный и внутренний радиусы кольца, соответственно.

$$\frac{q_2}{q_1} = \frac{\alpha_{\text{ЭФ}} r_{\text{П}}}{\lambda} \int_0^{\infty} \frac{2 J_1(z) (\rho_{\text{НАР}} J_1(\rho_{\text{НАР}} z) - \rho_{\text{ВНУТР}} J_1(\rho_{\text{ВНУТР}} z))}{z(z + \text{Bi})(\rho_{\text{НАР}}^2 - \rho_{\text{ВНУТР}}^2)} dz. (3)$$

Поменяв интегралы местами, проведем интегрирование по ρ и, принимая во внимание, что в области $\rho > 1$ справедливо соотношение $q_2 = \alpha_{\text{ЭФ}} \vartheta_{\text{СР}}$, получим выражение для определения отношения плотности среднеинтегрального по площади кольца теплового потока на поверхности ($\zeta = 0$) образца к плотности подводимого потока q_1 :

На основе формулы (3) для обратной величины q_1/q_2 построена специализированная номограмма (рис.2, б), позволяющая проектировать устройства типа А.

При определении отношения плотностей q_1/q_2 подводимого и рассеиваемого тепловых потоков в зависимости от $1/Bi$ возникает зона неопределенности. Однако при значениях $\lambda/(\alpha_{эф} r_{п})$ в диапазоне от 1 до 2 в зависимости от значения $r_{НАР}/r_{ВНУТР}$ эта зона отсутствует. Выбор оптимальных размеров пятна воздействия и условий теплообмена в зависимости от λ_{min} обеспечивает нижняя часть номограммы (рис.2, б). Это дает возможность обеспечить приемлемую зависимость $\lambda = f(q_1/q_2)$ на стадии конструирования прибора с помощью вариации радиуса $r_{п}$ пятна теплового воздействия, отношения $r_{НАР}/r_{ВНУТР}$ наружного и внутреннего диаметров, а также эффективного коэффициента $\alpha_{эф}$ теплообмена (используя отражающий или черный экраны). Варианты определения рабочей зоны прибора представлены ключами на номограмме рис.2, б. По измеренному значению отношения плотностей тепловых потоков определяем коэффициент теплопроводности материала из графиков зависимости q_1/q_2 от λ , пример которого для $r_{НАР}/r_{ВНУТР} = 2$ и $r_{п} = 5$ мм представлен на рис.2, в.

Благодаря тому, что $1/(\alpha_k + \alpha_e) \gg R_{ПТП2} + R_{КОНТ}$, вклад контактного термического сопротивления сведен к минимуму, что обосновано в работе [6].

В варианте Б чувствительный элемент преобразователя теплового потока ПТП2 (рис. 3, а) изготовлен в виде кольцевой термобатареи с радиусом r_T , что обеспечивает измерение локального теплового потока по радиусу согласно соотношению (3). ПТП2 окружает ПТП1, измеряющий плотность потока локального теплового воздействия q_1 .

В соответствии с графиками верхней части номограммы (рис. 3, б) минимальное значение комплекса $\lambda/(\alpha_{эф} \cdot r_{п})$ должно лежать в диапазоне от 0,6 до 2 в зависимости от отношения $r_T/r_{п}$. Исходя из этого требования, выбираем значение радиуса пятна теплового воздействия $r_{п}$ и условия проведения измерений. На рис. 3, в приведены графики зависимости q_2/q_1 от λ для $r_T/r_{п} = 2$ и $r_{п} = 3$ мм.

Представленная на рис. 3, б номограмма отношения плотностей подводимого q_1 и рассеиваемого q_2 тепловых потоков в зависимости от теплопроводности исследуемого материала при вариации эффективного коэффициента теплообмена, радиуса пятна теплового воздействия и отношения наружного и внутреннего радиусов кольца, вычислена по формулам (2)-(4). Этот вариант измерительной головки предполагает кольцевую конструкцию тепломера ПТП2, позволяющего определить плотность теплового потока по окружности радиусом r .

В варианте В в качестве ПТП2 использован разработанный в ИТТФ НАН Украины ленточный ПТП, выполненный в виде миниатюрного пояса Шмидта, позволяющий определять плотность среднеинтегрального по радиусу теплового потока.

Схема конструкции представлена на рис.4, а. Эта конструкция более технологична по сравнению с вышеописанными вариантами.

Определим аналогичные зависимости для третьего варианта конструкции, когда измерение поверхностной плотности теплового потока проводится с помощью ленточного ПТП 2, в котором спай расположены вдоль радиуса. Рассчитать ее величину можно путем интегрирования вдоль радиуса выражения для поверхностной плотности локального теплового потока $q_{ЛОК} = \alpha_{эф} \vartheta_{ЛОК}$:

$$\begin{aligned} \frac{q_2}{q_1} &= \int_{r_{ВНУТР}}^{r_{НАР}} \frac{q_{ЛОК}(0, \rho)}{q_1} \rho d\rho = \\ &= \alpha_{эф} \frac{r_{п}}{\lambda} \int_{r_{ВНУТР}}^{r_{НАР}} \int_0^{\infty} \frac{J_1(z) \rho J_0(\rho z)}{z + Bi} dz d\rho . \end{aligned} \quad (4)$$

Результаты расчета по формуле (4) представлены на номограмме рис. 4, б, что позволяет обоснованно, в зависимости от требуемого диапазона измеряемых значений λ , выбрать геометрические размеры устройства и условия проведения измерений. На рис. 4, в приведены результаты расчета для устройства со значениями $r_{НАР}/r_{ВНУТР} = 2$ и $r_{п} = 3$ мм.

Как показали расчеты, применение всех вариантов чисто теплотметрических головок позволило существенно уменьшить влияние определяю-

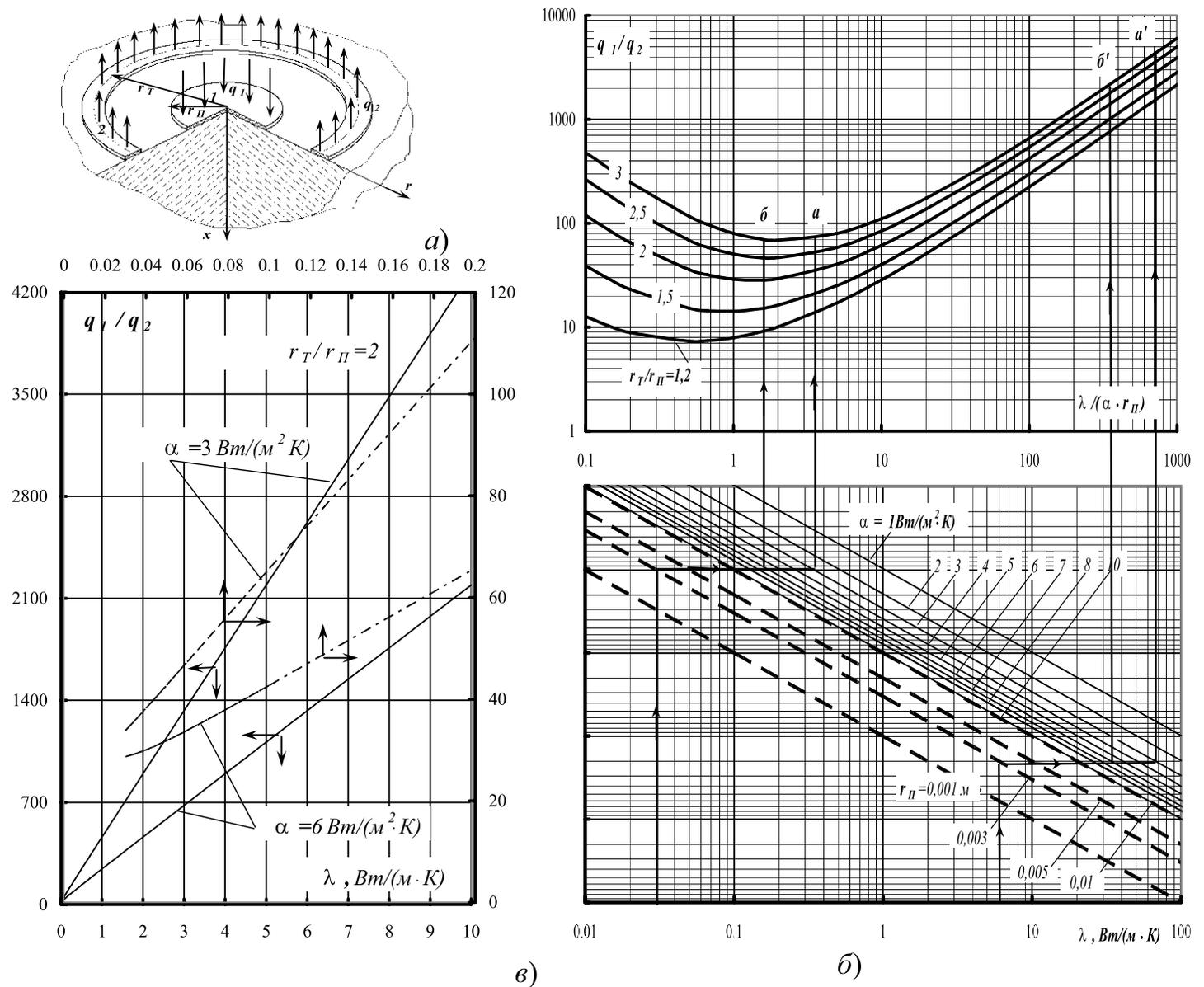


Рис. 3. Вариант Б. а) схема размещения нагревателя и преобразователя теплового потока в виде узкого кольца на плоскости исследуемого образца и номограмма для определения отношения плотности подводимого теплового потока к измеренному; б) номограмма для выбора определяющих параметров на стадии конструирования прибора с целью обеспечения его достаточной чувствительности; в) графики для определения коэффициента теплопроводности по значению отношения плотности подводимого теплового потока к плотности измеренного.

щих факторов. При этом отпала необходимость в измерении температуры и связанной с этим процессом весьма непростой операции по уменьшению контактного термического сопротивления.

Результаты расчета позволяют сделать следующий вывод: при измерении данным методом значение эффективного коэффициента теплообме-

на является определяющим фактором в создании термического сопротивления и, следовательно, в получении результата измерения.

Поэтому для надежности измерения необходимо предпринять меры по стабилизации эффективного коэффициента теплообмена $\alpha_{ЭФ}$, который определяется двумя составляющими

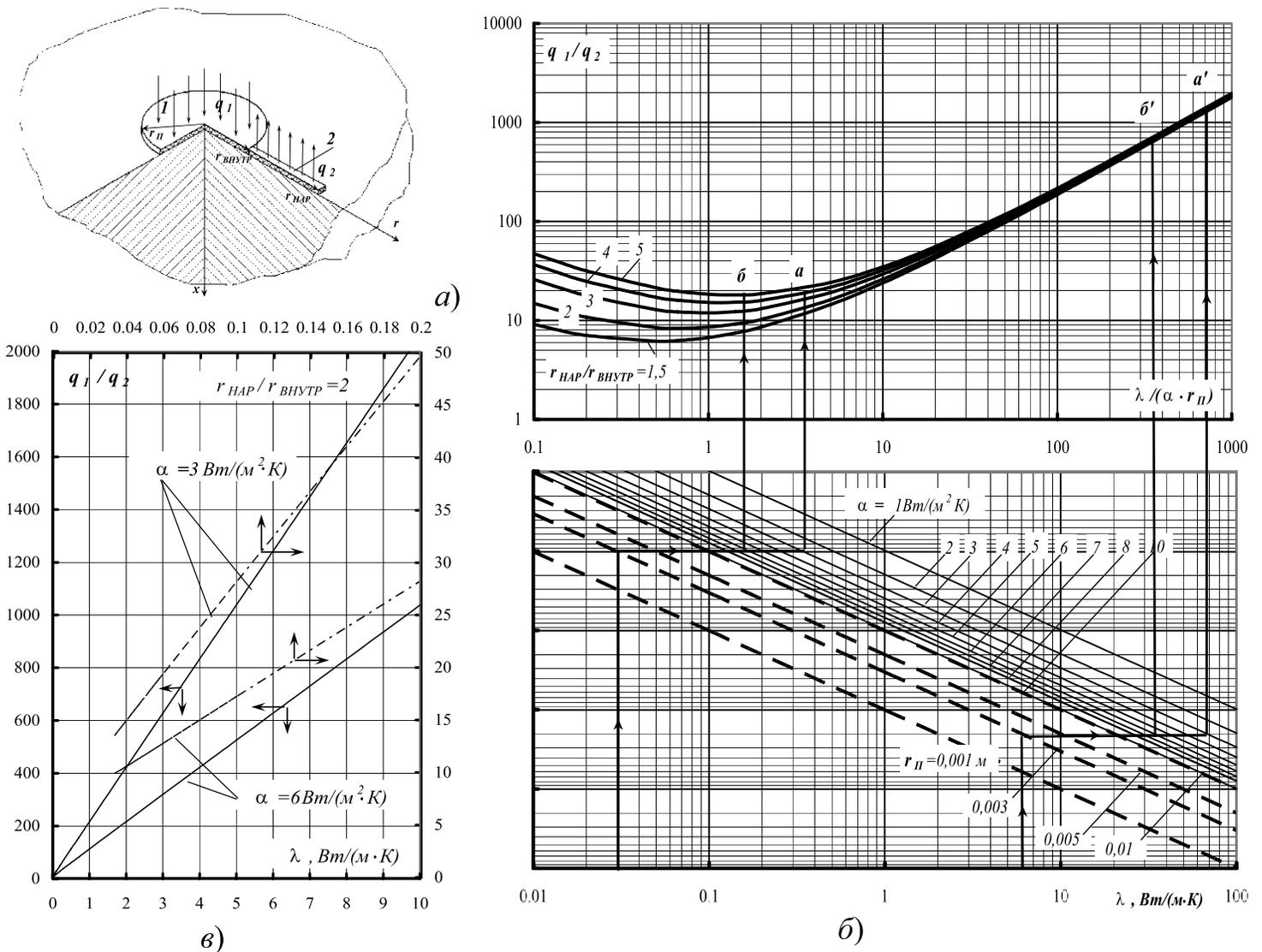


Рис. 4. Вариант В. а) схема размещения нагревателя и преобразователя теплового потока в виде узкой ленты на плоскости исследуемого образца; б) номограмма для выбора определяющих параметров на стадии конструирования прибора с целью обеспечения его достаточной чувствительности; в) графики для определения коэффициента теплопроводности по значению отношения плотности подводимого теплового потока к плотности измеренного.

конвективной $\alpha_{\text{к}}$ и радиационной $\alpha_{\text{э}}$. Конвективная составляющая по своей природе плохо поддается стабилизации, в то время как радиационную составляющую можно стабилизировать. Поэтому для уменьшения относительного вклада конвективной составляющей есть смысл увеличивать вклад радиационной составляющей. Это приводит к тому выводу, что в данном случае уместно не минимизировать степень черноты поверхности измеряемого образца, а наоборот, уве-

личивать ее до возможного максимума и тем самым увеличивать относительный вклад радиационной составляющей $\alpha_{\text{э}}$ в значение $\alpha_{\text{эф}}$.

Все конструкции измерительных головок, реализующие данный метод, калибруются по рабочим эталонам теплопроводности. При использовании приборов для измерения зондовым методом необходимо, чтобы условия калибровки и измерений были максимально идентичными.

Табл. 1. Значения методической погрешности определения теплопроводности по всему диапазону и поддиапазнам в зависимости от числа выбранных рабочих эталонов и значений их теплопроводности

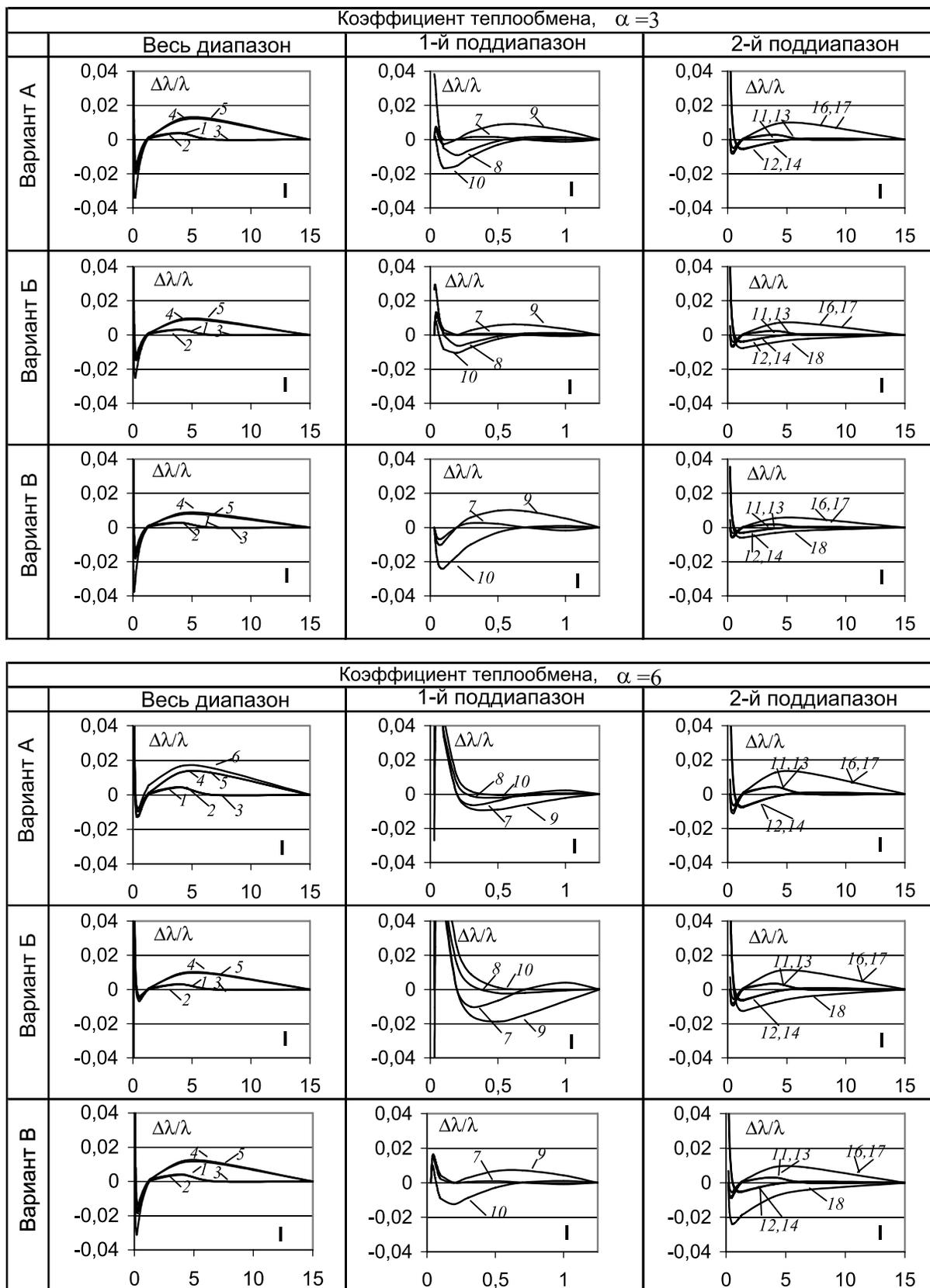


Табл. 2. Комбинации рабочих эталонов, используемых при градуировке

№ кривой	Пенополистирол	Полиметилметакрилат	Стекло ТФ1	Стекло ЛК5	Стекло КВ	Сплав ВТ6	Сплав 12Х18Н10Т	Степень полинома	Количество рабочих эталонов
	Теплопроводность рабочих эталонов, λ , Вт/(м·К)								
	0,03	0,196	0,699	1,25	1,35	6,825	15,0		
1	x	x	x	x	x	x	x	3	7
2	x	x		x	x	x	x	3	6
3	x	x		x		x	x	3	5
4	x	x		x			x	2	4
5	x			x			x	2	3
6	x	x					x	2	3
7	x	x	x	x				3	4
8	x	x	x	x				2	4
9	x	x		x				2	3
10	x		x	x				2	3
11		x	x	x	x	x	x	3	6
12		x	x	x	x	x	x	2	6
13		x		x	x	x	x	3	5
14		x		x	x	x	x	2	5
15		x		x	x		x	3	4
16		x		x	x		x	2	4
17		x		x			x	2	3
18		x					x	1	2

Каждая измерительная головка должна быть укомплектована набором рабочих эталонов теплопроводности, по которым проводятся периодические калибровки по процедуре, аналогичной рекомендациям ГОСТ 7076-99 и ИСО 8301:1991. При этом рабочие эталоны выбирают так, чтобы предполагаемое значение коэффициента теплопроводности исследуемого материала находилось в «вилке» значений выбранных эталонов.

Кроме того, необходимо, чтобы в комплект входили отражающий или «черный» экраны для стабилизации теплообмена при калибровке и измерениях. Благодаря этим мерам погрешность измерения не должна превышать удвоенной погрешности эталонов. Время измерения в зависимости от размеров пятна теплового воздействия составляет от 5 до 20 минут.

С целью определения методической погрешности при градуировке построены аппроксима-

ционные полиномиальные кривые для следующих трех диапазонов значений коэффициентов теплопроводности λ Вт/(м·К): весь диапазон (0,03 ... 15), 1-й поддиапазон (0,03 ... 0,699), 2-й поддиапазон (0,196 ... 15). Результаты, представленные в табл. 1 и 2, позволяют подобрать комбинации рабочих эталонов, обеспечивающие минимальные методические погрешности в зависимости от требуемого диапазона измерений. Можно подобрать такие эталоны, чтобы максимальная приемлемая методическая погрешность в основном диапазоне не превышала 2%. К примеру, нет необходимости использовать 7 или 6 рабочих эталонов, когда можно обойтись с достаточной погрешностью 4 или 3 эталонами и полиномом 2-й степени (кривые 4 и 5). А для варианта А при $\alpha_{эф} = 6$ Вт/(м²·К) подходит вариант трех рабочих эталонов (кривая 6), в то время как для вариантов Б и В такая комбинация не подхо-

дит. То же самое можно утверждать и относительно поддиапазонов. Кривая 9 в первом поддиапазоне получена вследствие применения трех сравнительно недорогих рабочих эталонов (пенополистирол, полиметилметакрилат и стекло ЛК5) и аппроксимации полиномом 2-й степени. Например, во 2-м поддиапазоне возможен вариант даже двух рабочих эталонов при линейной аппроксимации (кривая 18).

Выводы

1. Впервые показана возможность использования только теплоточных измерений при реализации метода локального теплового воздействия для определения теплопроводности широкого класса материалов.

2. Предложены три варианта конструктивного исполнения теплотрических головок, основанных на существующих и перспективных технологиях современной теплотрии. Принципиальным преимуществом предложенных конструкций является снижение требований к чистоте обработки поверхностей исследуемого материала и к стабилизации контактных сопротивлений.

3. Для стабилизации условий конвективно-радиационного теплообмена предложено использовать «черный» или отражающий экраны.

4. По результатам численного эксперимента даны рекомендации относительно минимально необходимого количества рабочих эталонов теплопроводности для обеспечения калибровки и поверки приборов.

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 ко-

эффициентов теплопроводности твердых материалов//Пром.теплотехника. — 2004. — Т.26, № 4. — С. 76—82.

3. 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.

4. Декуша О.Л. Прибор для экспресс-измерений коэффициента теплопроводности строительных материалов (ИТ8) // Пром.теплотехника. 2004. Т.26, № 6. — С. 212—216.

5. 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.

6. Декуша Л.В., Менделеева Т.В., Воробьев Л.И., Декуша О.Л. Метод локального теплового воздействия (зондовый метод) измерения теплопроводности материалов с выносными преобразователями температуры //Пром.теплотехника. — 2005. — Т.27, № 5. — С.100—106.

7. Декуша Л.В., Грищенко Т.Г., Менделеева Т.В. Измерение теплопроводности теплоизоляционных и строительных материалов (в развитие ГОСТ 7076-99 и ИСО 8301:1991) // Пром. теплотехника. — 2003. Т.25, № 3. — С. 79 — 87.

8. Декуша Л.В., Менделеева Т.В., Воробьев Л.И., Декуша О.Л. Прибор для экспресс-определения теплопроводности твердых материалов// Наукові праці IV Міжнар. науково-техн. конф. «Метрологія та вимірювальна техніка (Метрологія — 2004)», 12-14 жовтня 2004, Харків. Т.2. — С. 26—31.

9. Декуша Л.В., Менделеева Т.В., Воробьев Л.И., Декуша О.Л. Теплотрическое экспресс-определение теплопроводности твердых материалов// Наукові праці V Міжнар. науково-техн. конф. «Метрологія та вимірювальна техніка (Метрологія — 2006)», жовтень 2006, Харків. Т. 1. — С. 325—328.

Получено 04.06.2007 г.