

Експериментальні дослідження показали, що межа допустимої основної похибки розробленого приладу для вимірювання теплопровідності рідких і пастоподібних матеріалів становить не більше ніж 7 % в діапазоні λ_x від 0,1 до 1,0 Вт/(м·К), при довірчій ймовірності 0,95.

Отже, запропонований метод може знайти широке застосування для розроблення нових приладів для вимірювання теплопровідності рідин та пастоподібних матеріалів з високими метрологічними і функціональними характеристиками.

1. Теплофизические измерения и приборы / Под общей ред. Е.С. Платунова. – Л.: Машиностроение, Ленинградское отделение, 1986. – 256 с. 2. Новиченок Л.Н. Методы и приборы для измерения теплопроводности жидких сред/ Тез. докл. ВНТК: Методы и средства теплофизических измерений. – М., 1987. – Ч.1. – С. 70–71. 3. Пистун С.П., Рогоцкий Я.Г., Васильковский И.С. Повышение точности измерения теплопроводности на основе принципа инвариантности // Контрольно-измерительная техника. – Львів.: Вища школа, В-во при Львів. ун-ті, 1989. – Вып.45. – С. 29–32.

УДК 536.2:536.3:536.6:697.34

УНИВЕРСАЛЬНИЙ ПРИБОР ИТ-8М ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

© Декуша Олег, Воробьев Леонид, Декуша Леонид, 2007

Институт технической теплофизики НАН Украины, Желябова, 2а, Киев, Украина

teplomer@ukr.net

Розглянуто теоретичні основи створення приладу для експрес-вимірювань теплопровідності будівельних та ізоляційних матеріалів. Принцип роботи приладу заснований на методі локальної теплової дії на поверхню зразка. Розглянутий вплив контактної теплової опору і коефіцієнта теплообміну на поверхні зразка на результат вимірювань. Наведено основні технічні характеристики розробленого приладу.

Рассмотрены теоретические основы создания прибора для экспресс-измерений теплопроводности строительных и изоляционных материалов. Принцип работы прибора основан на методе локального теплового воздействия на поверхность образца. Рассмотрено влияние контактного теплового сопротивления и коэффициента теплообмена на поверхности образца на результат измерений. Приведены основные технические характеристики разработанного прибора.

Theoretical bases of device creation for expressmeasurements of heat conductivity of build and isolatings materials are considered. Principle of work of device is based on the method of the local thermal affecting surface of specimen. Influence of contact thermal resistance and heat-transfer coefficient is considered on-the-spot specimen on the result of measurings. Basic technical descriptions of the developed device are resulted.

Необходимость экономного отношения к энергии и энергоресурсам вызвала увеличение спроса на теплоизоляционные материалы. Для контроля их качества можно использовать не только дорогостоящие стационарные приборы, цикл измерения в которых составляет от нескольких часов до нескольких суток, но и приборы – тестеры, позволяющие определять коэффициент теплопроводности за 5...30 мин., доступные по цене как производителю, так и потребителю строительных материалов. Таким средст-

вом, позволяющим определять теплопроводность твердых, пористых, волокнистых и сыпучих материалов, является прибор ИТ-8М, разработанный в ИТТФ.

Работа прибора основана на закономерностях теплообмена в полуограниченном теле при локальном тепловом воздействии на его поверхность известным тепловым потоком. Основная теоретическая зависимость [1, 2], положенная в основу метода, имеет вид:

$$J(r, z) = \frac{q \cdot r_{ППП}}{l} \cdot I(r, z), \quad (1)$$

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

$$Bi = a \cdot r_{ППП} / I,$$

где $J(r,z) = T(r,z) - T_{\infty}$ – избыточная температура, равная разности значений температуры поверхности образца в пятне воздействия и в зоне образца с неискаженным температурным полем; q – плотность теплового потока, I – коэффициент теплопроводности образца, $r_{ППП}$ – радиус преобразователя плотности теплового потока; a – эффективный коэффициент теплообмена с окружающей средой.

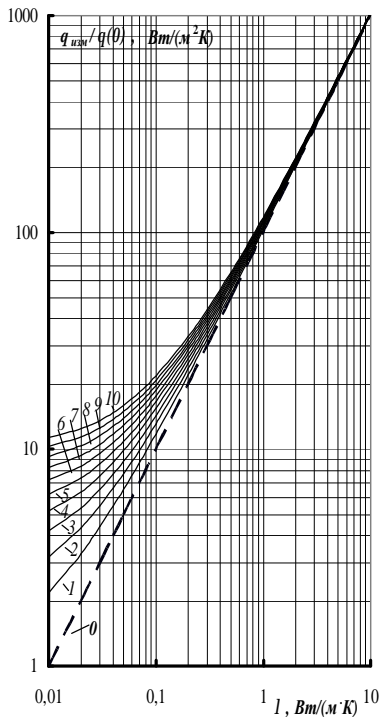
Если измеряется среднеинтегральная температура на поверхности образца в зоне теплового воздействия $DJ(0)$, с учетом влияния контактного теплового сопротивления R_K , выражение (1) примет вид:

$$q_{ИЗМ} / DJ(0) = \frac{1}{(r_{ППП} / I + R_K) \cdot I_{SR}(0)}, \quad (2)$$

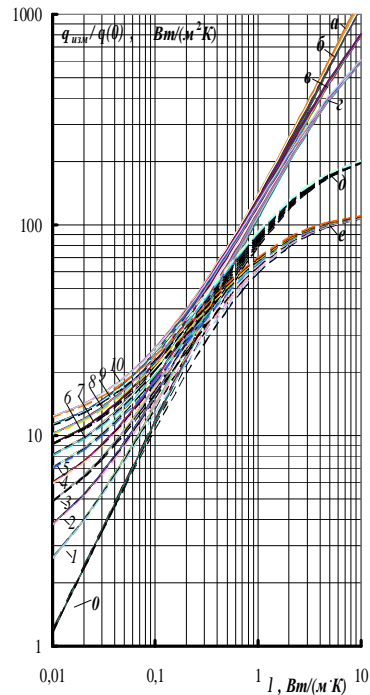
где $I_{SR}(z) = 2 \int_0^{\infty} \frac{\exp(-z \cdot x)}{x + Bi} \cdot \frac{J_1^2(x)}{x} dx.$

Аналитическое решение позволило исследовать зависимость комплекса измеряемых величин $q_{ИЗМ} / DJ(0)$ от коэффициента теплопроводности массива I при радиусе пятна воздействия, равном радиусу ПТП в отсутствие контактного теплового сопротивления. С этой целью выполнены расчеты при вариации значений коэффициента теплообмена a в диапазоне от 0 до $10 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ с шагом в $1 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$. Результаты счета представлены на рис. 1, а. Из анализа этих графиков следует, что условия теплообмена поверхности массива с окружающей средой влияют на значение комплекса измеряемых величин $q_{ИЗМ} / DJ(0)$ при значениях коэффициента теплопроводности $I < 1 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$.

Поэтому при работе с материалами, коэффициент теплопроводности которых меньше $1 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$, необходимо принимать меры по снижению влияния коэффициента теплообмена a .



а – в отсутствие контактного теплового сопротивления ($R_K = 0 \text{ м}^2 \text{К}/\text{Вт}$)

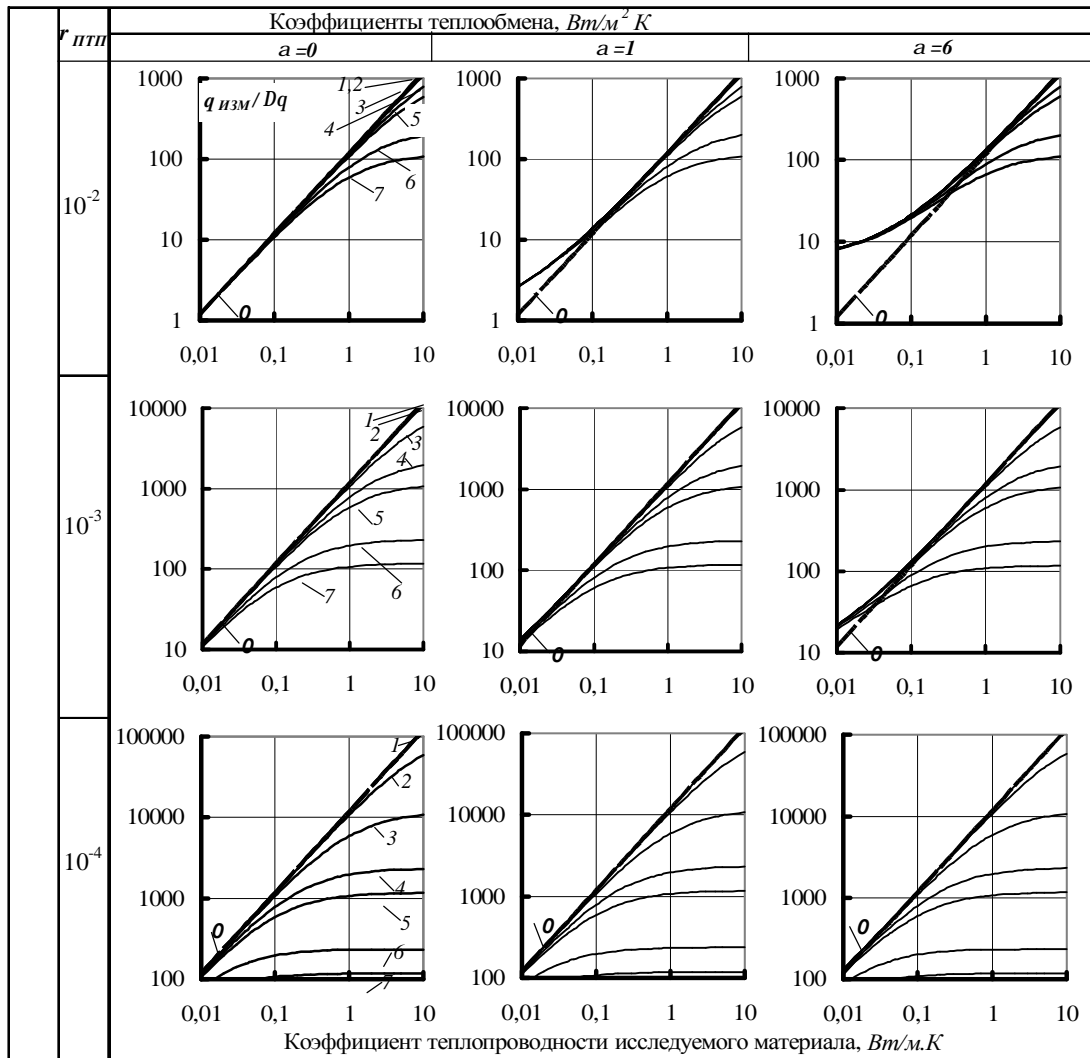


б – при наличии контактного теплового сопротивления $a - R_K = 0$ и $R_K = 10^{-5} \text{ м}^2 \text{К}/\text{Вт}$; б – 10^{-4} ; в – $5 \cdot 10^{-4}$; г – 0,001; д – 0,005; е – 0,01

0 – $a = 0 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \text{К})$; 1 – 1; 2 – 2; 3 – 3; 4 – 4; 5 – 5; 6 – 6; 7 – 7; 8 – 8; 9 – 9; 10 – 10

Рис. 1. Зависимость $q_{ИЗМ} / DJ(0)$ в центре площадки контакта радиусом $r_{ППП} = 10 \text{ мм}$ от коэффициента теплопроводности материала при вариации эффективного коэффициента теплообмена и контактного теплового сопротивления

Влияние контактного теплового сопротивления на отношение $q_{изм}/DJ(0)$ прибора при различных радиусах пятна для различных материалов и коэффициентов конвективного теплообмена



0 - $a=0$ и $R_k=0$; 1 - $R_k=0$; 2 - 10^{-5} ; 3 - 10^{-4} ; 4 - $5 \cdot 10^{-4}$; 5 - 10^{-3} ; 6 - $5 \cdot 10^{-3}$; 7 - 0,01

Поскольку значение радиационной составляющей коэффициента теплообмена a . существенна, необходимо уменьшить степень черноты поверхности. Первый возможный вариант – это теплоизоляция поверхности образца, например, использовать покрытие пенофолом. Второй возможный вариант – применение специального экрана [3] с малой степенью черноты ($\epsilon = 0,05 \dots 0,10$). Уменьшения и стабилизации a также можно добиться размещением прибора под образцом.

Характер изменения зависимости $q_{изм}/DJ(0)$ от коэффициента теплопроводности λ при вариации эффективного коэффициента теплообмена a и контактного теплового сопротивления R_k показан на рис. 1.

Из зависимостей, приведенных на рис. 1, б, следует, что с увеличением коэффициента теплопроводности материала возрастает влияние контактного теплового сопротивления. Поэтому необходимо предпринять ряд мер, которые позволят уменьшить его влияние. С этой целью выполнены расчеты зависимости отношения измеренной плотности теплового потока к избыточной разности температур $q_{изм}/DJ(0)$ от коэффициентов теплопроводности материалов для различных радиусов пятна теплового воздействия $r_{птп}$ и эффективных коэффициентов конвективного теплообмена a при вариации контактного теплового сопротивления R_k . Как следует из

графиков табл. 1, при радиусе пятна теплового воздействия $r_{ПТП} = 0,01\text{м}$ влияние на отношение $q_{ИЗМ} / DJ(0)$ материалов с коэффициентом теплопроводности $l < 1 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ зависит, в основном, от коэффициента теплообмена a . При меньшем радиусе пятна теплового воздействия влияние контактного термического сопротивления отмечается во всем диапазоне коэффициентов теплопроводности.

Таким образом, для уменьшения влияния контактного теплового сопротивления на результаты измерения необходимо либо увеличить радиус пятна теплового воздействия, либо, если это невозможно, предпринимать меры по уменьшению контактного теплового сопротивления. К этим мерам относятся: шлифовка контактной поверхности образца до соответствующего класса обработки; применение высоко-теплопроводных смазок; использование дополнительных выносных дифференциальных термопар [4].

В выражении (1) место определения T_{∞} четко не обозначено, что в реальных условиях измерений на образцах ограниченных размеров является одним из источников методической погрешности. Источником случайной составляющей погрешности является временной дрейф температуры массива во время эксперимента.

Чтобы исключить эти факторы, влияющие на погрешность, целесообразно воспользоваться приемом, широко распространенным в калориметрии [5], то есть дифференциальным методом, и ввести ПТП-референт, как это показано на рис. 2.

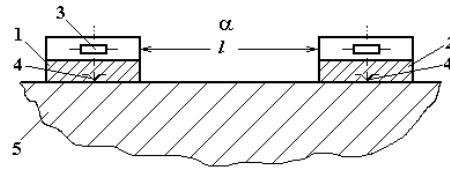


Рис. 2. Дифференциальная схема измерений при реализации метода локального теплового воздействия: 1 – основной ПТП; 2 – ПТП-референт; 3 – рабочий источник теплового воздействия; 4 – термопара; 5 – массив

Для определения расстояния l , при котором зона расположения ПТП-референта не подвержена искажениям из-за локального теплового воздействия, проанализирован характер изменения приведенной плотности локального теплового потока в радиальном направлении по поверхности полубесконечного массива. На рис. 3, а представлены результаты расчета при вариации числа Био.

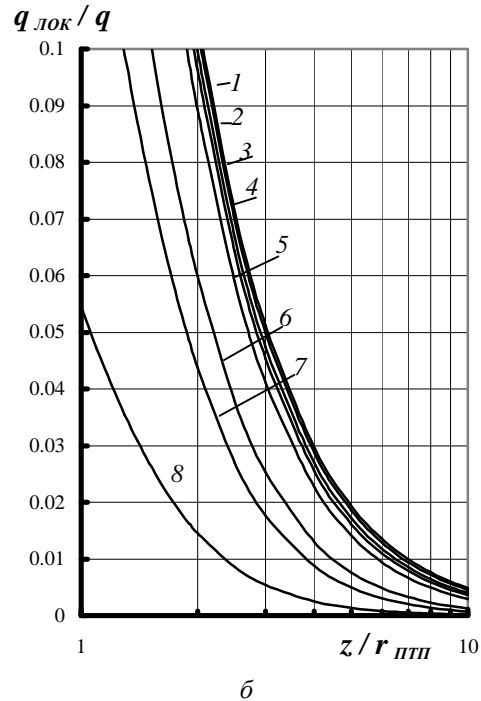
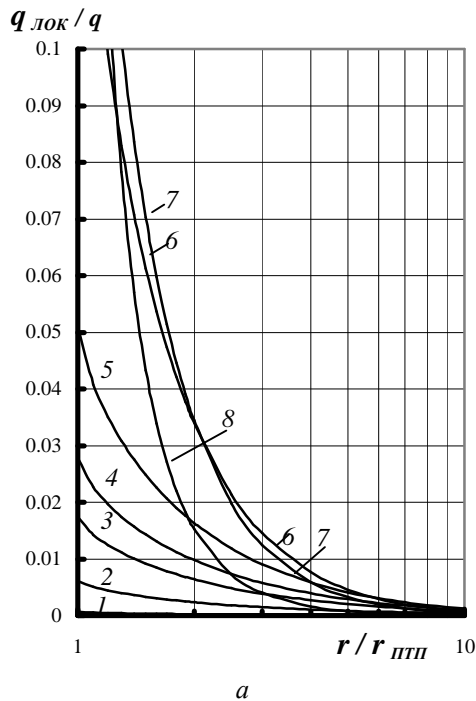


Рис. 3. Характер изменения приведенной плотности локального теплового потока на поверхности за пределы пятна в радиальном направлении (а) и по ширине (б) полубесконечного массива при вариации чисел Био: 1 – $Bi = 0,001$; 2 – 0,01; 3 – 0,03; 4 – 0,05; 5 – 0,1; 6 – 0,5; 7 – 1,0; 8 – 5,0



а



б



в



г

Рис. 4. Внешний вид прибора ИТ-8М и варианты его расположения относительно исследуемого образца: а – ИТ-8М ; б – ИТ-8М с установленной емкостью для сыпучих материалов; в – ИТ-8М, установленный на образец; г – ИТ-8М с образцом, установленным сверху

Для тех же значений чисел Био выполнены расчеты по определению степени приведенной плотности локального теплового потока по ширине массива, результаты которых представлены на рис. 3, б.

Анализ результатов показывает, что ПТП-референт должен находиться от основного пятна теплового воздействия на расстоянии не менее 5 радиусов пятна, то есть $l \geq 5r_{ПТП}$, а образцы материалов с известной теплопроводностью, которые используются при градуировке и аттестации средства измерения, должны также иметь толщину не менее 5 радиусов пятна.

Корректность результатов измерения описанным методом зависит от теплофизических свойств и

геометрических размеров чувствительного элемента ПТП и его охранной зоны. Результаты аналитического исследования характеристик и параметров ПТП, предназначенных для установки в теплофизический прибор, описаны в работах [6–8].

Основываясь на изложенных выше теоретических результатах, мы разработали прибор ИТ-8 и его модификацию ИТ-8М (рис. 4).

Диаметр пятна воздействия в приборе составляет 20 мм, что позволяет измерять пористые материалы с диаметром пор и сыпучие материалы с размером частиц до 3 мм. Влияние контактных тепловых сопротивлений начинает заметно сказываться при

$I > 1$ Вт/(м·К) поэтому при измерении твердых материалов рекомендуется использовать контактные смазки либо дополнительные преобразователи температуры. Нестабильность теплообмена, влияние которого особенно велико при исследовании образцов с теплопроводностью $I < 1$ Вт/(м·К), устраняется использованием специального экрана с малой степенью черноты ($\epsilon = 0,05 \dots 0,10$) и размещением прибора под образцом. Влияние дрейфа температуры снижается за счет выполнения прибора с двумя идентичными измерительными головками, разнесенными на расстояние более трех диаметров пятна воздействия. Так же прибор может работать в двух положениях:

“Образец сверху” – используется для измерений образцов сыпучих, пористых и гомогенных материалов, “Образец снизу” – используется для измерений пористых и гомогенных материалов. При исследовании образцов, толщина которых менее 70 мм [9], коэффициент теплопроводности материала $I_{обр}$ определяют по формуле (3):

$$I_{обр} = c \cdot I_{изм}, \tag{3}$$

где c – поправочный коэффициент, зависимость которого от теплопроводности и толщины образца приведена на рис. 5.

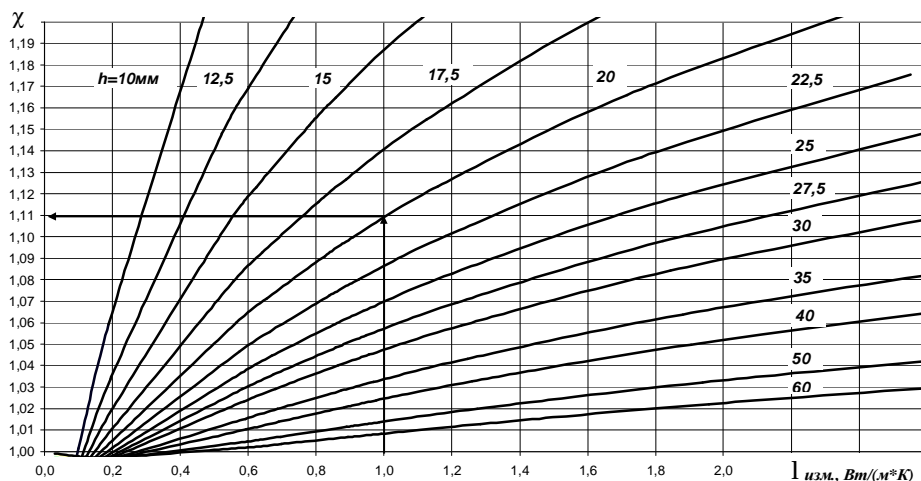


Рис. 5. Зависимость поправочного коэффициента от толщины образца и измеренного значения теплопроводности

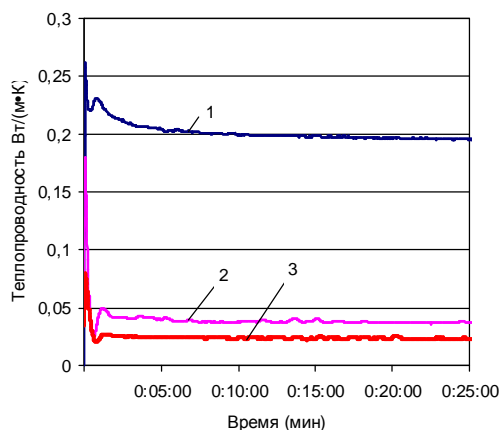


Рис. 6. Характер выхода на режим прибора ИТ-8М для материалов с коэффициентом теплопроводности $I < 0,2$ Вт/(м·К): 1 – оргстекло ($\lambda = 0,196$); 2 – ПС-30 ($\lambda = 0,038$); 3 – пенополиуретан ($\lambda = 0,023$)

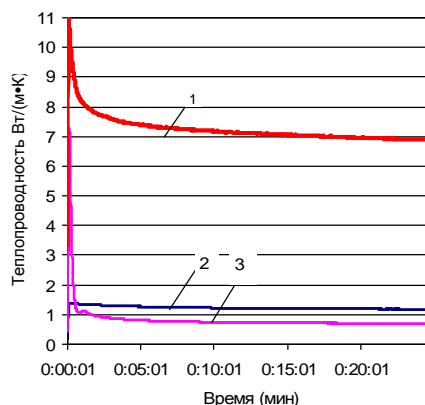


Рис. 7. Характер выхода на режим прибора ИТ-8М для материалов с коэффициентом теплопроводности $I > 0,2$ Вт/(м·К): 1 – ВТ-6 ($\lambda = 6,708$); 2 – ЛК-5 ($\lambda = 1,165$); 3 – ТФ-1 ($\lambda = 0,698$)

Для теоретического определения времени локального теплового воздействия на поверхность образца, необходимого для корректного измерения коэффициента теплопроводности, можно воспользоваться решениями и рекомендациями, приведенными в [10, 11]. Однако эти решения не учитывали влияния теплообмена поверхности исследуемого материала с окружающей средой. Поэтому для определения времени выхода на режим были осуществлены эксперименты на разработанном приборе с использованием рабочих эталонов, результаты которых приведены на рис. 6, 7.

Из полученных экспериментальных данных видно, что через 25 минут после начала эксперимента процессы можно рассматривать как стационарные.

Прибор ИТ-8М аттестован в Укрметрестандарт по “Программе и методике метрологической аттестации” ПМА 081/24.263-2004. По результатам метрологической аттестации прибору ИТ-8 приписана основная относительная погрешность измерения 8% в диапазоне коэффициентов теплопроводности от 0,03 до 1,5 Вт/(м·К).

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. Влияние определяющих факторов на результаты измерения коэффициентов теплопроводности методом локального теплового воздействия // Пром. теплотехника. – 2005, Т.27, № 2. – С. 74 – 80. 3. Михеев М.А., Михеева И.М. Основы теплопередачи. Изд 2-е. – М.: Энергия, 1977. – 344 с. 4. 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. 5. Кальве Э., Прат А. Микроккалориметрия. – М.1963. – 477с. 6. Грищенко Т.Г., Декуша Л.В., Менделеева Т.В. Об оценке корректности показаний преобразователя теплового потока при исследовании теплоизоляционных свойств материалов // Пром. теплотехника. – 1996, Т.18, № 5. – С. 55 – 58. 7. Декуша Л.В., Менделеева Т.В. Об особенностях измерения стационарного теплового потока, проходящего через бесконечную пластину, по обе стороны которой происходит конвективный теплообмен. – “Депонированные научные работы”, ГНТБ Украины № 93-Ук2003, Киев: 2003. – 25 с. 8. Декуша Л.В., Менделеева Т.В. Об особенностях измерения стационарного теплового потока, проходящего через бесконечную пластину, по обе стороны которой происходит конвективный теплообмен. – “Депонированные научные работы”, ГНТБ Украины № 93-Ук2003, Киев: 2003. – 25 с. 9. Декуша Л.В., Менделеева Т.В., Воробьев Л.И., Декуша О.Л. Особенности экспресс-измерения теплопроводности на образце конечной толщины прибором ИТ-8. // Промтеплотехника, т. 26, № 5, 2004. – С.76-81. 10. Пехович А.И., Жидких В.М. Расчеты теплового режима твердых тел. – Л.: Энергия, 1968. – 304 с. 11. Чуриков А.А. Сенкевич А.Ю. Многостадийный метод и информационно-измерительная система неразрушающего контроля теплофизических свойств // Вестник ТГТУ, т.8, № 1, 2002. – С.62–69.