

УДК 536.5:536.6: 531.714:006.354

**Бурова З.А., Воробьев Л.И., Грищенко Т.Г., Декуша Л.В., Декуша О.Л., Шаповалов В.И.**

*Институт технической теплофизики НАН Украины*

## ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ СТРОИТЕЛЬНЫХ И ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Розроблено установку ИТ-7С для вимірювання коефіцієнта теплопровідності будівельних та теплоізоляційних матеріалів по ДСТУ Б В.2.7-105-2000 (ГОСТ 7076-99), а також запропоновано методику її метрологічної атестації.

Разработана установка ИТ-7С для измерения коэффициента теплопроводности строительных и теплоизоляционных материалов по ДСТУ Б В.2.7-105-2000 (ГОСТ 7076-99), а также предложена методика ее метрологической аттестации.

Complex ИТ-7С is developed for building materials and heat insulators heat conductivity factor measurements by ISO 8301:1991, and also a technique of its metrological certification is offered.

$A$  – площадь,  $m^2$ ;  
 $E$  – электрический сигнал ПТП, мВ;  
 $h$  – толщина образца, м;  
 $I$  – электрический ток, А;  
 $K$  – коэффициент преобразования, Вт/( $m^2 \cdot mB$ );  
 $q$  – плотность теплового потока, Вт/ $m^2$ ;  
 $R$  – тепловое сопротивление,  $m^2 \cdot K$ /Вт;  
 $T$  – температура,  $^{\circ}C$  или К;  
 $U$  – напряжение постоянного тока, В;  
 $\delta$  – относительная погрешность, %;  
 $\lambda$  – коэффициент теплопроводности, Вт/( $m \cdot K$ ).

### Индексы нижние:

$v$  – верхний;  
 $k$  – контактный;  
 $n$  – нижний;  
 $эл$  – электрический;  
 $i$  – номер теплового режима;  
 $q$  – плотность теплового потока.

### Сокращения:

ПТП – преобразователь теплового потока;  
 БТИ – блок тепловой изоляции (боковой активной).

В рамках государственной программы энергосбережения и экономии топливных ресурсов при повышении требований к качеству тепловой защиты зданий и сооружений в современном строительстве широко используются новые типы строительных и теплоизоляционных материалов, а также их различные сочетания как отечественного, так и зарубежного производства.

Основная проблема в области исследования теплопроводности таких материалов состоит в том, что их коэффициенты теплопроводности достигают значений 0,018 Вт/( $m \cdot K$ ), тогда как действующей государственной поверочной схемой по ГОСТ 8.140-82 [1] установлено обеспечение рабочими эталонами диапазона значений коэффициента теплопроводности от 0,1 Вт/( $m \cdot K$ ) до 5 Вт/( $m \cdot K$ ).

С другой стороны, измерение коэффициента теплопроводности твердых и сыпучих теплоизоляционных и строительных материалов в Украине в настоящее время регламентировано национальным стандартом ДСТУ Б В.2.7-105-2000 (ГОСТ 7076-99) [2] и международным стандартом ISO 8301:1991 [3]. Согласно этим документам, допускаемая основная погрешность измерений коэффициента теплопроводности должна составлять  $\pm 3\%$ , что противоречит требованиям [1], так как только одна из составляющих допускаемой основной погрешности, обусловленная погрешностью рабочего эталона теплопроводности, уже составляет  $\pm 3\%$ .

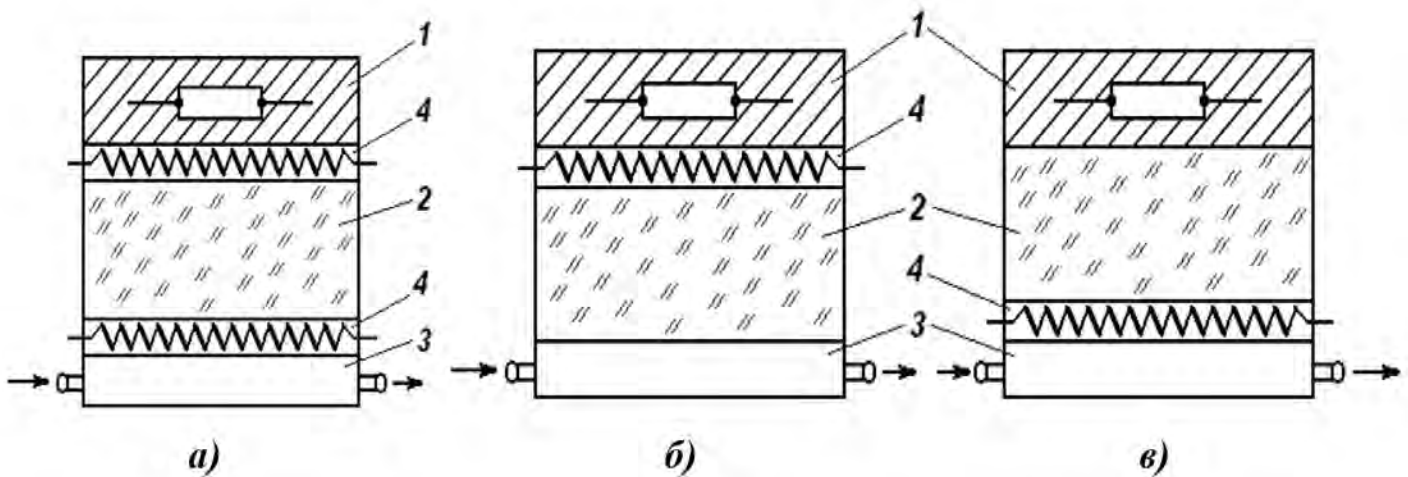
В ИТТФ НАН Украины разработана установка ИТ-7С, которая соответствует требова-

ниям стандарта [2] и не имеет аналогов в Украине. Также разработана и утверждена методика ее метрологической аттестации с применением калибровочного нагревателя, позволяющая достичь требуемой в [2] точности измерений без использования рабочих эталонов теплопроводности.

В рекомендациях стандарта [2] предложены три схемы устройства прибора, реализующего регламентированный в нем метод определения теплопроводности:

– симметричная схема, по которой прибор оснащен двумя ПТП, расположенными на теплоотдающей поверхности нагревателя и теплопринимающей поверхности холодильника, между которыми помещают исследуемый образец (рис. 1, а);

– асимметричная схема, по которой прибор оснащен одним ПТП, расположенным между исследуемым образцом и нагревателем (рис. 1, б) или между образцом и холодильником (рис. 1, в).



**Рис. 1. Схемы приборов для измерения коэффициента теплопроводности с применением ПТП: а) – схема прибора с двумя ПТП (симметричная); б, в) – схема прибора с одним ПТП (асимметричная). 1 – нагреватель, 2 – образец, 3 – холодильник, 4 – ПТП.**

При проектировании теплового блока установки ИТ-7С, в которой реализована симметричная схема (см. рис. 1, а), применены полученные в отделе теплотрии ИТТФ НАН Украины аналитические решения по основным вопросам достижения необходимой точности измерений и соответствия требованиям нормативных документов.

Для измерения коэффициента теплопроводности в этой установке реализован метод пластины [4], сущность которого заключается в создании стационарного теплового потока через

плоский образец, направленного перпендикулярно к его лицевым (наибольшим) поверхностям (далее по тексту – рабочим поверхностям). Коэффициент теплопроводности определяется по результатам измерений поверхностной плотности теплового потока, прошедшего через образец, разности температур его рабочих поверхностей и толщины образца.

Для обеспечения одномерности измеряемого теплового потока толщина исследуемого образца должна быть, согласно [2], не более 0,2 эффективного поперечного размера (ребра или

диаметра) образца материала, который составляет не менее 250 мм, то есть 50 мм. Конструктивное исполнение теплового блока данной установки, применение активной боковой изоляции измерительной ячейки и симметричная схема измерения плотности теплового потока позволяют проводить измерения коэффициента теплопроводности на образцах толщиной до 120 мм.

Установка ИТ-7С (рис. 2) состоит из теплового блока 1, в котором размещают образец исследуемого материала и обеспечивают требуемый тепловой режим, электронного блока 2, содержащего средства регулирования теплового режима и приема первичной измерительной ин-

формации, и блока опорных спаев термопар 3. Подъемно-опускная платформа 4 служит для облегчения процесса сборки-разборки измерительной ячейки установки и для транспортирования ее в пределах лабораторного помещения при необходимости. При проведении исследований в температурных режимах ниже комнатных, тепловой блок помещают в климатическую камеру 5. Контроль тепловых режимов, обработку информации электронного блока и расчеты величин выполняют на компьютере со специализированным программным обеспечением.



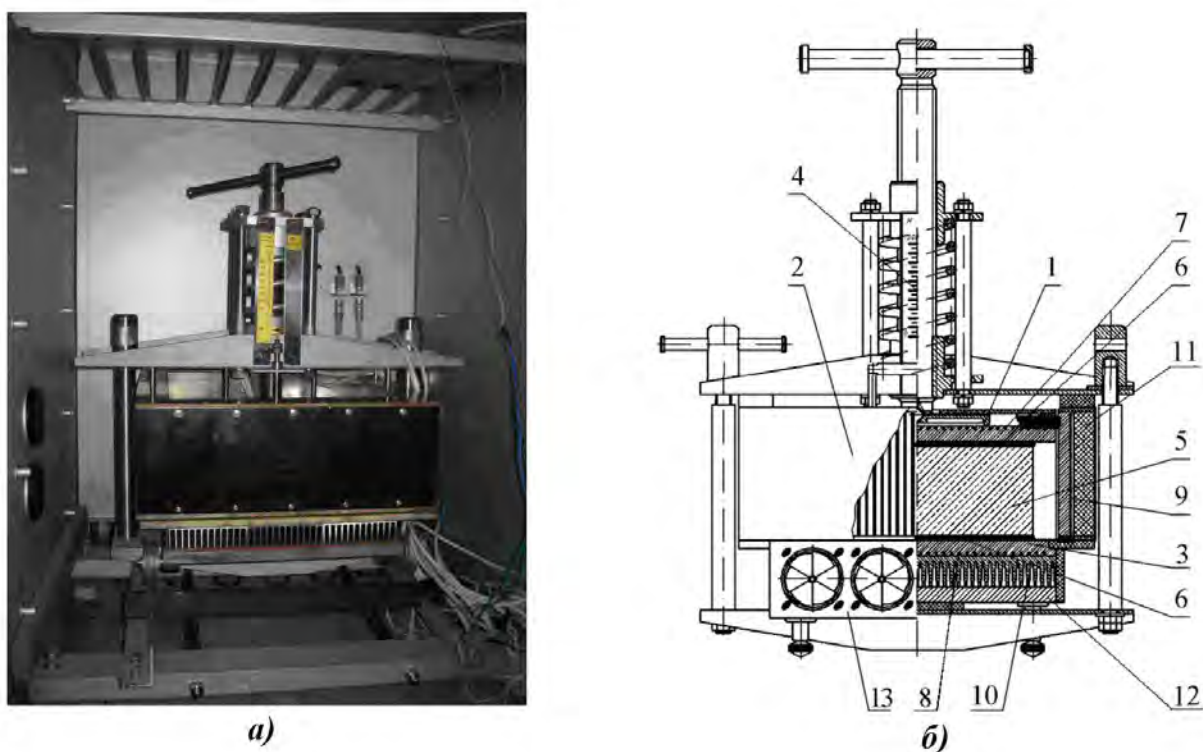
**Рис. 2. Внешний вид установки ИТ-7С:**

**1 – тепловой блок; 2 – электронный блок; 3 – блок опорных спаев термопар;  
4 – подъемно-опускная платформа; 5 – климатическая камера.**

Основными элементами теплового блока, конструктивная схема которого приведена на рис. 3, б), являются: измерительная ячейка 1, блок боковой активной теплоизоляции 2, блок охлаждения 3 и прижимное устройство 4.

Измерительная ячейка 1 предназначена для размещения в ней образца исследуемого материала и обеспечения требуемых тепловых и температурных режимов. Образец 5 устанавливают

между тепломерами 6, в качестве которых использованы преобразователи теплового потока (ПТП) по ДСТУ 3756 (ГОСТ 30619) [5], также являющиеся разработкой ИТТФ НАН Украины. Информативным параметром выходного сигнала ПТП является термоэлектродвижущая сила. Посадочное место в измерительной ячейке для исследуемого образца позволяет исследовать образец, максимальные размеры



**Рис. 3. Тепловой блок установки ИТ-7С:**  
 а) – внешний вид, б) – конструктивная схема.

**1 – измерительная ячейка; 2 – блок боковой активной теплоизоляции;**  
**3 – блок охлаждения; 4 – прижимное устройство; 5 – исследуемый образец;**  
**6 – термомеры; 7, 8, 9 – электрические нагреватели; 10 – радиатор;**  
**11, 12 – тепловая изоляция; 13 – станина.**

которого составляют  $300 \times 300 \times 120$  мм.

Тепловой поток через образец задают верхним электрическим нагревателем 7. Высокая теплопроводность металла, из которого изготовлен его корпус, способствует созданию изотермических условий по теплоотдающей поверхности нагревателя 7. Теплоотвод от теплоотдающей поверхности исследуемого образца осуществляют кондуктивно-конвективным способом посредством теплоприемника, который с целью исключения жидкого хладагента имеет электрический нагреватель 8 (нижний) и радиатор 10, представляющий собой набор плит с профильным ребрением, смонтированных на общем основании, а сьем теплоты производится за счет обдува воздухом с помощью блока вентиляторов 3.

Для исключения влияния внешних факторов на тепловое поле образца боковая поверхность измерительной ячейки выполнена в виде блока активной теплоизоляции 2, который состоит из четырех охранных электрических нагревателей 9, снабженных изоляцией и закрытых общим кожухом.

Расчет коэффициента теплопроводности образца  $\lambda$ , в Вт/(м·К) выполняется по формуле

$$\lambda = \frac{h}{\frac{2 \cdot (T_B - T_H)}{(q_B + q_H)} - R_K}, \quad (1)$$

где  $T_B - T_H$  – разность значений температуры, соответственно, верхней и нижней рабочих поверхностей образца;

$q_B$  и  $q_H$  – поверхностная плотность теплового потока, проходящего, соответственно, через верхнюю и нижнюю рабочие поверхности образца;

$R_K$  – суммарное контактное тепловое сопротивление между поверхностями образца и преобразователями температуры теплотеметрических блоков.

В формуле (1) измеряемыми являются величины  $h, T_B, T_H, q_B, q_H$ , при этом:

- значение толщины  $h$  измеряют электронным штангенциркулем;
- значения  $T_B$  и  $T_H$  измеряют первичными термоэлектрическими преобразователями температуры типа ТХК со статической характеристикой преобразования  $L$  по стандарту [6];
- значения поверхностной плотности теплового потока  $q_B$  и  $q_H$  измеряют с помощью ПТП, индивидуальная оцененная функция преобразования которых имеет вид

$$q = K_q \cdot E, \quad (2)$$

где  $K_q$  – коэффициент преобразования ПТП,

определяемый при градуировании;  
 $E$  – измеряемый электрический сигнал ПТП.

Градуировка установки ИТ-7С сводится к определению функции преобразования ПТП и контактного теплового сопротивления.

Для определения функции преобразования ПТП использован метод двух измерений [7]. При этом разность температур теплоотдающей поверхности верхнего ПТП и теплопринимающей поверхности нижнего ПТП поддерживают постоянной. Этим методом возможно градуировать ПТП в широком диапазоне температур, проходя его ступенчато с любым шагом.

Для проведения градуировки по плотности теплового потока применен калибровочный нагреватель, который размещают в измерительной ячейке между верхним и нижним ПТП. Специальный электрический калибровочный нагреватель представляет собой прямоугольную плоскую пластину, в которой равномерно уложен нагревательный провод. На рисунке 4 представлены полученные функции преобразования верхнего и нижнего ПТП установки ИТ-7С №2, описываемые соответствующими полиномами, которые впоследствии прописаны в программе расчетов коэффициентов теплопроводности.

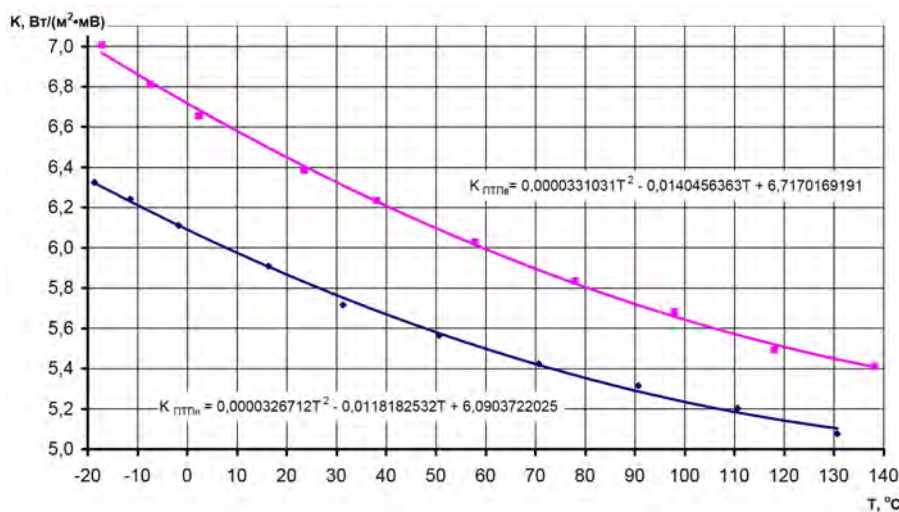


Рис. 4. Функции преобразования верхнего  $K_{ПТП_{верх}}$  и нижнего  $K_{ПТП_{ниж}}$  ПТП, описанные соответствующими полиномами.

Для определения контактного теплового сопротивления  $R_k$  проведена серия измерений при сведенных друг с другом верхним и нижним ПТП теплового блока установки, вычислено значение контактного сопротивления и результат введен в компьютерную программу расчета коэффициента теплопроводности в качестве поправки. Для исследования твердых материалов в установке предусмотрено использование эластичных прокладок с вмонтированными на их поверхности преобразователями температуры ленточного типа, что минимизирует значение  $R_k$  контактного сопротивления при наличии дополнительной высокотеплопроводной смазки до порядка  $10^{-5}$ , которым можно пренебречь.

Определение метрологических характеристик установки ИТ-7С по стандартной методике осуществляют сличением измеренного на установке ИТ-7С значения коэффициента теплопроводности рабочего эталона с его значением, указанным в соответствующем свидетельстве.

Определение допускаемой основной относительной погрешности измерения и установление ее границ выполняют при средней температуре  $17\text{ }^\circ\text{C}$  с применением пяти различных рабочих эталонов теплопроводности, а именно: пенополистирола ПС-150, органического стекла (ГОСТ 17622) и оптических стекол ЛК5 (ГОСТ 13659), КВ (ГОСТ 15130) и ТФ1 (ГОСТ 13659). Определение диапазона измерения коэффициентов теплопроводности производят в трех температурных точках, соответствующих началу, середине и концу интервала рабочих значений температуры образца с применением одного рабочего эталона теплопроводности – оптического стекла ЛК5, значение коэффициента теплопроводности которого лежит в средней части диапазона измерений.

По результатам метрологической аттестации по стандартным образцам установка ИТ-7С № 02 допущена к применению для измерения коэффициента теплопроводности материалов в диапазоне значений от  $0,03\text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$  до  $3,0\text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$  в интервале рабочих температур от минус  $40$  до  $140\text{ }^\circ\text{C}$  с пределами допускаемой основной относительной погрешности измере-

ния  $\pm 5\%$ , включая погрешность рабочих эталонов теплопроводности  $\pm 3\%$ .

Однако, такой уровень погрешности не удовлетворяет требованиям [2, 3], поэтому в ИТТФ НАН Украины разработана методика метрологической аттестации установки ИТ-7С с применением электрического калибровочного нагревателя, которая позволяет достичь требуемой стандартами [2, 3] точности  $\pm 3\%$  без использования рабочих эталонов теплопроводности.

Согласно предложенной методике, определение метрологических характеристик установки осуществляют по методу косвенных измерений путем оценки погрешности измерений параметров, используемых при определении коэффициента теплопроводности – среднего теплового потока, разности значений температуры и толщины образца.

Определение диапазона измерения коэффициента теплопроводности совмещают с определением погрешности измерения плотности среднего теплового потока и выполняют экспериментально путем задания с помощью калибровочного электрического нагревателя нормированных значений теплового потока из диапазона возможных при измерениях. Измерения проводят путем последовательного задания  $i = 10$  тепловых режимов. Первые пять режимов проводят при температуре нагревателя, холодильника и БТИ, равной  $70\text{ }^\circ\text{C}$  – средней температуре рабочего температурного диапазона, путем задания пяти значений суммарного теплового потока из диапазона изменений. Последующие пять режимов проводят при тепловом потоке, соответствующем середине диапазона изменения плотности теплового потока, а температуры нагревателя, холодильника и БТИ соответствуют пяти точкам рабочего диапазона температуры.

Для каждого  $i$ -того теплового режима частные значения относительной погрешности измерения теплового потока определены по формуле:

$$\delta_{q-i} = \frac{(q_{Hi} - q_{Bi}) - q_{Эли}}{q_{Эли}} \times 100\% \quad (3)$$

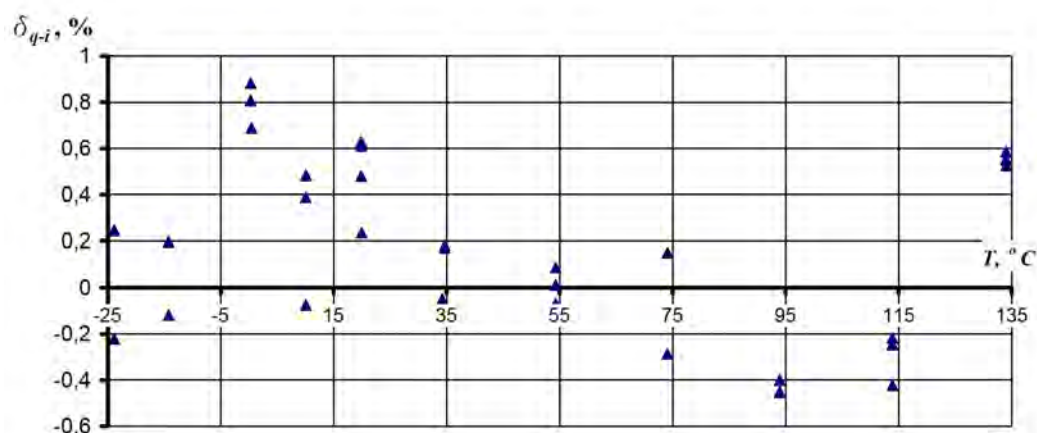


Рис. 5. Разброс составляющей погрешности измерения плотности теплового потока  $\delta_{q-i}$  установки ИТ-7С №2 в диапазоне температур от минус 25 °С до 135 °С.

в котором плотность теплового потока, создаваемая электрическим калибровочным нагревателем, равна:

$$q_{эл} = \frac{U \times I}{A}, \quad (4)$$

где  $A$  – площадь поверхности зоны пластины, в которой уложен нагревательный провод.

По результатам измерений и последующих расчетов составляющая погрешности измере-

ния плотности теплового потока  $\delta_{q-i}$  установки ИТ-7С № 2 в диапазоне температур от минус 25 °С до 135 °С не превышает  $\pm 1\%$ , что показано на диаграмме, представленной на рис. 5.

Определение диапазона значений рабочей температуры совмещают с определением погрешности измерения среднего теплового потока и с определением погрешности измерения разности значений температуры при задании ряда значений температуры из рабочего диапазона.

Табл. 1. Основные технические характеристики установок типа ИТ-7С

Название установки, год выпуска, внедрение	ИТ-7С №1 2004, НИИСК	ИТ-7С №2 2008, ИТТФ	ИТ-7С №3 2009, Укрметртест- стандарт
Диапазон измеряемых значений коэффициента теплопроводности, Вт/(м·К)	0,03...3,0	0,03...3,0	0,02...1,5
Пределы допускаемой основной относительной погрешности измерения коэффициента теплопроводности, %	$\pm 6$	$\pm 5$	$\pm 3$
Диапазон рабочих температур, °С	-40...+135	-40...+140	-40...+180
Температура термостатирования опорных спаев термопар, °С	$50 \pm 2$	$50 \pm 2$	$50 \pm 2$
Размер исследуемого образца, мм	300×300	300×300	300×300
• габариты (диаметр)	10...120	10...120	10...120
• толщина			

Погрешность измерения разности температур определяют экспериментально путем сличения показаний термоэлектрических преобразователей температуры, размещенных в эластичных прокладках установки ИТ-7С, с показаниями термоэлектрического преобразователя температуры индивидуальной градуировки с абсолютной погрешностью измерений температуры 0,1 К в диапазоне от минус 40 °С до 180 °С. Погрешность измерения разности температур определяют на семи участках из диапазона рабочих значений температуры. На каждом из участков диапазона на регуляторах нагревателя, холодильника и БТИ задают начальную температуру и проводят сличение показаний преобразователей, а затем на регуляторах задают конечную температуру, значение которой должно превышать значение начальной температуры примерно на 10 К, и вновь проводят сличение показаний преобразователей. По результатам измерений и расчетов, погрешность измерения разности температур не превышает 1 % в диапазоне рабочих температур от минус 40 °С до 180 °С.

Разработанная методика метрологической аттестации по методу косвенных измерений утверждена в ДП «Укрметртестстандарт». По этой методике проведена метрологическая аттестация новой установки ИТ-7С (№ 03), по результатам которой данная установка допущена к применению для измерения коэффициента теплопроводности строительных и теплоизоляционных материалов в диапазоне значений от 0,02 Вт/(м·К) до 1,5 Вт/(м·К) в интервале рабочих температур от минус 40 °С до 180 °С с пределами допускаемой основной относительной погрешности измерения  $\pm 3\%$ , что соответствует требованиям стандартов [2, 3].

В данное время в ИТТФ НАН Украины разработаны и внедрены три установки ИТ-7С, основные технические характеристики которых приведены в табл. 1.

Метрологическая аттестация установок ИТ-7С №1 и ИТ-7С №2 проводилась по методике с использованием рабочих эталонов теплопроводности, их допускаемая основная относительная погрешность измерений составляет  $\pm 6\%$  и  $\pm 5\%$  соответственно. Установка ИТ-7С №3 аттестована по методу косвенных измерений с допускаемой основной относительной погрешностью  $\pm 3\%$  в диапазоне измеряемых значений коэффициента теплопроводности от 0,02 Вт/(м·К) до 1,5 Вт/(м·К). Это позволило значительно расширить номенклатуру современных строительных и теплоизоляционных материалов, исследуемых на установке ИТ-7С в соответствии с требованиями стандартов [2, 3], в том числе, с регламентированной ими высокой точностью.

### **Выводы**

1. Разработана установка ИТ-7С для исследования коэффициента теплопроводности строительных и теплоизоляционных материалов, которая соответствует требованиям Межгосударственного ГОСТ 7076-99 и национального ДСТУ Б В.2.7-105-2000 стандартов, гармонизированных с Международным стандартом ISO 8301:1991 и не имеет аналогов в Украине.

2. Разработана и утверждена в Укрметртестстандарт методика метрологической аттестации установки ИТ-7С по методу косвенных измерений с применением калибровочного нагревателя, что позволяет достичь требуемой стандартом [2, 3] точности измерений без использования рабочих эталонов теплопроводности.

### **ЛИТЕРАТУРА**

1 *ГОСТ 8.140-82* Государственная система обеспечения единства измерений. Государственный первичный эталон и государственная поверочная схема для средств измерений теплопроводности твердых тел от 0,1 до 5 Вт/(м·К) в диапазоне температур 90 - 500 К и от 5 до



20 Вт/(м·К) – в диапазоне температур 300 - 100 К.

2 *ДСТУ Б В.2.7-105-2000* (ГОСТ 7076-99) Матеріали та вироби будівельні. Метод визначення теплопровідності і термічного опору при стаціонарному тепловому режимі.

3 *ISO 8301:1991* Thermal insulation – Determination of steady-state thermal resistance and related properties – Heat flow meter apparatus (Теплоизоляция. Определение термического сопротивления и связанных с ним теплофизических показателей при стационарном тепловом режиме. Прибор, оснащенный тепломером).

4 *Теоретичні* основи розрахунку та проектування установок для визначення теплопровідності. Звіт про НДР (заключний)/ Інститут технічної теплофізики НАН України. –

№ Держреєстрації 0101U002314. – Київ, 2003. – 176 с.

5 *ДСТУ 3756-98* (ГОСТ 30619-98) Енергозбереження. Перетворювачі теплового потоку термоелектричні загального призначення. Загальні технічні умови.

6 *ДСТУ 2837-94* (ГОСТ 3044-94) Перетворювачі термоелектричні. Номінальні статичні характеристики перетворення.

7 *Декуша Л.В.* Теплометрические измерительные преобразователи для исследования сложного теплообмена: Дисс. ... канд. техн. наук. – Киев, 1990.– 278 с.

*Получено 05.11.09 г.*