

## СОЗДАНИЕ НАЦИОНАЛЬНОГО ЭТАЛОНА ЕДИНИЦЫ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ

**Кривонос П.В., Дикун Т.И., Крышнева А.М.**

*Белорусский государственный институт метрологии*

*Минск, Республика Беларусь*

Работа по созданию Национального эталона единицы теплопроводности проводилась в Белорусском государственном институте метрологии совместно с ФГУП "ВНИИМ им. Д.И. Менделеева", РФ, Санкт-Петербург в период со 2 квартала 2011 по 1 квартал 2014 года.

В данной статье рассматриваются научные и практические вопросы создания эталонных установок по воспроизведению единицы теплопроводности и исследованию мер теплопроводности.

**Введение.** Потребность в измерении теплопроводности существует практически в любых областях науки и промышленности. Особую актуальность точные измерения теплопроводности имеют в строительстве и энергетике, металлургии и материаловедении, электронике и машиностроении. Точные измерения теплопроводности материалов широко используются в приоритетных направлениях развития науки, технологий и техники.

Введение большого числа новых энергосберегающих стандартов в строительстве обусловило появление определенных проблем в работе сертификационных и испытательных центров. Необходимость технологического контроля и сертификации материалов по теплопроводности возникает при производстве и эксплуатации новых материалов различного назначения, а также при испытаниях на соответствие требованиям нормативных документов наиболее ответственных элементов сложных инженерных объектов, таких как ограждающие конструкции зданий и сооружений. Это особенно важно для материалов, теплопроводность которых является сертифицируемым параметром.

На предприятиях и в организациях республики имеется достаточно большой парк приборов и установок для измерения теплопроводности, в том числе и прецизионных. Для обеспечения единства измерений теплопроводности в диапазоне от 0,02 Вт/(м·К) до 5 Вт/(м·К) требуется воспроизводить единицу с суммарной стандартной неопределенностью, не превышающей 0,5 %, и передавать размер единицы прецизионным средствам измерения, гарантируя, что предел их относительной погрешности не превысит 3 %.

Работы по выполнению задания "Создать Национальный эталон единицы теплопроводности" государственной научно-технической программы "Разработка и изготовление эталонов Беларуси, уникальных приборов и установок для научных

исследований" проведены в период со II квартала 2011 г. по I квартал 2014 г.

Результатом выполненных работ:

- создание Национального эталона единицы теплопроводности, отвечающего современным требованиям науки и промышленности;
- повышение точности измерений теплопроводности;
- метрологическое обеспечение средств измерений теплопроводности, мер теплопроводности.

По результатам патентных исследований установлено, что данный эталон обладает патентной чистотой в отношении Республики Беларусь.

**Состав эталона.** В состав эталона входят:

- эталонная установка А-1 для воспроизведения теплопроводности в диапазоне от 0,02 до 0,2 Вт/(м·К);
  - эталонная установка А-2 для воспроизведения теплопроводности в диапазоне от 0,02 до 5 Вт/(м·К);
  - наборы мер теплопроводности
- Эталонные установки А-1 и А-2 включают:
- термостаты жидкостные LAUDA PROLINE RP 845;
  - регуляторы-измерители температуры ПОЛИКОН 812;
  - мультиметры KEITHLEY 2700;
  - малогабаритные модульные системы питания Agilent Technologies N6700B;
  - модули центрального и охранного нагревателей.

**Эталонные установки А-1, А-2.** В основу созданных эталонных установок положен стационарный метод горячей плиты с охранной зоной, являющийся наиболее точным методом определения теплопроводности. Измеритель теплопроводности собран по симметричной схеме.

В установках А-1, А-2 плиты-холодильники выполнены из меди. Рабочие поверхности характеризуются допускаемой высотой неровностей  $R_z$  0,1. Отклонение рабочих поверхностей от плоскостности не превышает 20 мкм (0,006 %). Каждая плита состоит из основания и крышки.

Отличительной особенностью установок является разработка новой конструкции наиболее сложного и ответственного узла – модуля центрального и охранного нагревателей, представляющего собой диск диаметром 200 мм с центральной измерительной секцией диаметром 100 мм и кольцевой охранной зоной. В соответствии с СТБ ISO 8302 внешним диаметром модуля центрального и охранного нагревателей опреде-

ляются минимальные габариты испытываемых образцов: 300 мм в диаметре или по стороне квадратного основания.

Согласно СТБ ISO 8302 диаметр центральной секции должен быть в четыре раза, а диаметр охранной зоны – в восемь раз больше максимальной толщины образца. Таким образом, установки позволяют исследовать образцы материалов толщиной до 50 мм.

Существенной и с трудом поддающейся учёту является погрешность, обусловленная теплоотдачей с боковой поверхности модуля центрального и охранного нагревателей. Для уменьшения этой систематической составляющей погрешности следует проектировать модуль центрального и охранного нагревателей с минимально возможной толщиной. При проектировании и изготовлении установок за счёт применения принципиально новых технических решений удалось выполнить модуль центрального и охранного нагревателей толщиной 0,7 мм. Модуль центрального нагревателя состоит из симметрично расположенных относительно собственно центрального нагревателя трёх слоёв: изоляционного, термопарного и несущего.

Каждый термопарный слой содержит две абсолютные термопары в точках с радиусом 10 мм, а также шестнадцать спаев дифференциальных термопар, равномерно распределённых по окружности с радиусом 70 мм. Термопары выполнены из медного и константанового электродов в лаковой изоляции диаметром 0,08 мм. Пространство между термопарами заполнено синтетической плёнкой толщиной 0,1 мм с теплопроводностью 0,2 Вт/(м·К). Все термопары закрепляются на клеевой основе.

**Проведение испытаний.** Воспроизведение единицы теплопроводности на эталонных установках А-1 и А-2 осуществляется методом горячей плиты с помощью измерителя теплопроводности с симметричным первичным преобразователем. Теплопроводность – это один из видов переноса энергии от их тёплых участков к холодным в результате теплового движения и взаимодействия микрочастиц. Теплопроводность проявляет себя при наличии градиента температуры  $\text{grad}T$  и в одномерном стационарном случае описывается эмпирическим соотношением, на основе экспериментально полученных данных

$$q = -\lambda \text{grad}T \quad (1)$$

где  $q$  – поверхностная плотность теплового потока, Вт/м<sup>2</sup>;

$\text{grad}T$  – градиент температуры, К/м;

$\lambda$  – теплопроводность, Вт/(м·К).

Тепловое сопротивление  $R_T$  представляет собой отношение разности температур между двумя изотермическими поверхностями  $\Delta T$  к поверхностной плотности теплового потока между ними

$$R_T = \frac{\Delta T}{q}, \quad (2)$$

где  $R_T$  – тепловое сопротивление, (м<sup>2</sup>·К)/Вт;

$\Delta T$  – разности температур между двумя изотермическими поверхностями, К;

Введённое в некую систему тепло затрачивается на приращение внутренней энергии и совершение механической работы, исключая возможность совершения системой механической работы путем сохранения постоянства её объёма, можно записать

$$c_v \frac{\partial T}{\partial \tau} - \text{div} \lambda \cdot \text{grad}T = 0, \quad (3)$$

где  $c_v$  – изохорная теплоёмкость единицы объёма, Дж/(м<sup>3</sup>·К)

$\tau$  – время, с;

$\text{div} \lambda \cdot \text{grad}T = \text{div}(-q)$  – дивергенция поверхностной плотности теплового потока.

Наличие в системе внутренних источников тепла учитывается введением в уравнение (3) их объёмной плотности  $q_v$

$$c_v \frac{\partial T}{\partial \tau} - \text{div} \lambda \cdot \text{grad}T - q_v = 0. \quad (4)$$

Уравнение измерений теплопроводности в общем случае можно записать в виде

$$\lambda = f(T, \tau, \text{grad}T, c_v, q, q_v). \quad (5)$$

Используемая методика прецизионных измерений теплопроводности должна содержать минимальное число неизвестных параметров, определяемых с максимально возможной точностью.

Равенство нулю левой части выражения (6) служит основным классификационным признаком для стационарных методов измерений теплопроводности

$$\frac{dT}{d\tau} = 0. \quad (6)$$

Для метода горячей плиты с помощью измерителя теплопроводности с симметричным первичным преобразователем уравнение измерения теплопроводности имеет следующий вид

$$\lambda = \frac{0,5qh}{\Delta T}, \quad (7)$$

где  $h$  – высота (толщина) образца, мм;

Поскольку тепловой поток делится между образцами поровну, в выражение (7) введён коэффициент 0,5.

Поверхностную плотность создаваемого при этом теплового потока рассчитывают по формуле

$$q = \frac{V \cdot I}{S}, \quad (8)$$

где  $V$  – напряжение электрического тока  $I$ , подводимого к нагревателю площадью  $S$ .

Функция измерения теплопроводности образцов  $\lambda$  с учетом принятого способа измерения количества теплоты, подводимой к централь-

ному нагревателю, и его геометрии определяется по формуле

$$\lambda = \frac{2 \cdot V \cdot I \cdot h}{\pi \cdot D^2 \cdot \Delta T}, \quad (9)$$

где  $V$  – напряжение постоянного электрического тока, создаваемое на основном нагревателе, В;

$I$  – электрический ток, пропускаемый через основную нагреватель, А;

$h$  – толщина образца, мм;

$D$  – расчетное значение диаметра центрального нагревателя, мм;

$\Delta T$  – перепад температуры на образце, К.

**Сличения.** В 3-м квартале 2013 года проведены сличения по теплопроводности в диапазоне от 0,03 до 0,2 Вт/(м·К) в температурном диапазоне от 10 до 40 °С, в которых участвовали национальные метрологические институты России (ВНИИМ – пилот), Республики Беларусь (БелГИМ) и Республики Казахстан (КазИнМетр).

Цель сличений состоит в предварительной оценке возможных расхождений результатов измерений в ключевом сличении КОOMET или МКМВ.

**Транспортируемый эталон сравнения (ТЭС).** В качестве ТЭС используют образцы пеноплекса и органического стекла, специально изготовленные из теплоизоляционных материалов, которые включены в Каталог эталонных материалов ВНИИМ.

**Результаты сличений.** Измерения теплопроводности проводились при температуре  $(23,0 \pm 0,5)^\circ\text{C}$  и повороте верхнего образца на  $90^\circ$ , на  $180^\circ$  и на  $270^\circ$ ; при температуре  $(10,0 \pm 0,5)^\circ\text{C}$  и при температуре  $(40,0 \pm 0,5)^\circ\text{C}$ .

Полученные результаты сличений представлены в графической форме на рисунках 1 – 4.

**Заключение.** На основе результатов, полученных при исследовании метрологических характеристик эталона, можно сделать вывод, что создание эталона позволит:

- создать государственную систему метрологического обеспечения измерений теплопроводности твердых материалов;

- обеспечить научные подразделения, работающие в области энергосберегающих технологий, прецизионными средствами измерений теплопроводности;

- обеспечить потребность научного приборостроения в методах и средствах измерений тепловых величин, в аттестованных эталонных мерах, служащих для калибровки и поверки установок по определению теплопроводности;

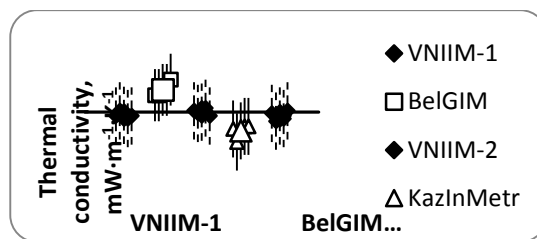


Рисунок 1 – Результаты измерений теплопроводности образцов из пеноплекса при 23 °С.

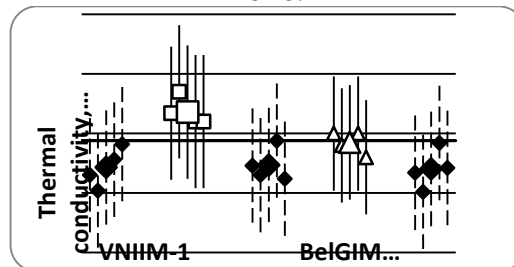


Рисунок 2 – Результаты измерений теплопроводности образцов из оргстекла при 23 °С.

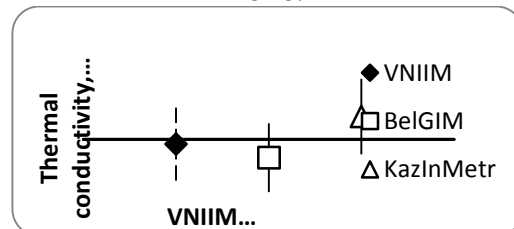


Рисунок 3 – Результаты измерений теплопроводности образцов из пеноплекса при 10 °С

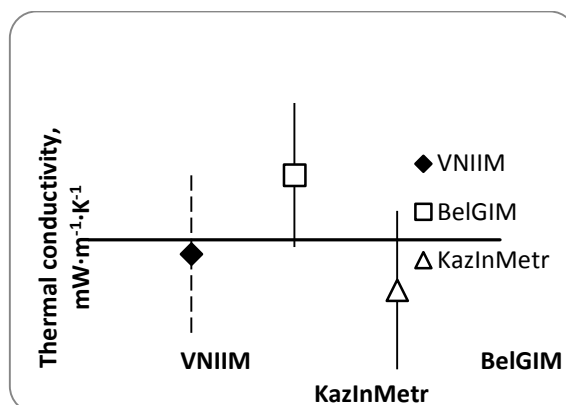


Рисунок 4 – Результаты измерений теплопроводности образцов из пеноплекса при 40 °С

- обеспечить потребность проектных и промышленных предприятий в стандартных и справочных данных о теплофизических свойствах материалов.