

УДК 677.017.56

ОЦЕНКА ПРИГОДНОСТИ МЕТОДИКИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СУММАРНОГО ТЕПЛООВОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ НА УСТАНОВКЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КЛИМАТИЧЕСКОЙ КАМЕРЫ

*Петюль И.А., доц., Шеверина Л.Н., доц., Сапелко В.В., инж.
Витебский государственный технологический университет,
г. Витебск, Республика Беларусь*

Ключевые слова: методика выполнения измерений, оценка неопределенности результата измерения, суммарное тепловое сопротивление.

Реферат. В результате проведения экспериментальных исследований теплозащитных свойств пакетов материалов, используемых для изготовления специальной защитной одежды, была разработана методика выполнения измерений на установке с использованием климатической испытательной камеры.

Основным документом, распространяющимся на методики выполнения измерений (далее – МВИ) и устанавливающим общие положения и требования, относящиеся к разработке, стандартизации МВИ и метрологическому надзору (контролю) за ними, является ГОСТ 8.010-2013 [1]. В соответствии с требованиями данного стандарта разработана МВИ «Определение суммарного теплового сопротивления на установке с использованием климатической камеры».

Разработанная методика распространяется на пакеты материалов для специальной одежды, предназначенной для защиты от пониженных температур, и устанавливает метод определения суммарного теплового сопротивления пакетов материалов как показателя их теплозащитных свойств в условиях теплообмена с окружающим воздухом.

В основу предлагаемого метода положен принцип нестационарного теплового режима. Его сущность заключается в определении времени охлаждения нагретого тела, изолированного от окружающей среды испытуемым материалом.

Порядок выполнения измерений по разработанной методике следующий: нагревательный элемент вместе с датчиками температуры помещается внутрь прямоугольного конверта, размером $(180 \times 125) \pm 5$ мм, и запаковывается с помощью зажима. Исследуемый объект закрепляется на стойке в климатической камере. После создания необходимых условий цилиндр нагревают до 60 °С с помощью источника питания. Изменения температуры фиксируют с помощью цифрового регистратора температуры. Для выравнивания температурного поля нагревательный элемент охлаждают до температуры 55 °С, после чего включается секундомер и фиксируется время охлаждения пластины (τ) до перепада температур 45 °С. В методике суммарное тепловое сопротивление образца ($R_{\text{сум}}$) в $\text{м}^2 \cdot \text{°С}/\text{Вт}$ вычисляют по следующей формуле:

$$R_{\text{сум}} = \frac{S_{\text{пр}} \cdot \tau}{c \cdot m}, \quad (1)$$

где $S_{\text{пр}}$ – площадь поверхности пробы, через которую совершается теплообмен, м^2 ; τ – время остывания нагревательного элемента в заданном интервале температур, с; c – удельная теплоемкость нагревательного элемента, $\text{Дж}/\text{кг} \cdot \text{°С}$; m – масса нагревательного элемента, кг.

В соответствии с ГОСТ 8.010 требования к точности измерений приводят путем задания показателей точности, которыми могут быть составляющие погрешности (методические, инструментальные, вносимые оператором), неопределенность измерений, правильность, повторяемость, прецизионность, воспроизводимость.

В разработанной методике показатели точности измерений заданы через пределы относительной погрешности измерений ($\pm 5\%$) и расширенную неопределенность измерений ($\pm 0,020 \text{ м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}$).

Абсолютная и относительная погрешности опробованного метода рассчитывались исходя из известных значений суммарного теплового сопротивления образцов, определенных по стандартной методике (ГОСТ 20489-52) в УП «Центр испытаний и сертификации ТООТ» (табл. 1).

Таблица 1 – Абсолютная и относительная погрешности опробованного метода

| № образца | $R_{\text{сум}}$, $\text{м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}$, по разраб. МВИ | $R_{\text{сум}}$, $\text{м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}$, по стандарт. методике | Абсолютная погрешность, Δ , $\text{м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}$ | Относительная погрешность, δ , % | $\delta_{\text{ср}}$, % |
|-----------|--|---|---|---|--------------------------|
| 1 | 0,711 | 0,725 | 0,014 | 1,931 | 5 |
| 2 | 0,646 | 0,629 | 0,017 | 2,703 | |
| 3 | 0,655 | 0,645 | 0,01 | 1,550 | |
| 4 | 0,575 | 0,524 | 0,051 | 9,733 | |
| 5 | 0,696 | 0,645 | 0,051 | 7,907 | |
| 6 | 0,394 | 0,377 | 0,017 | 4,509 | |

При оценке неопределенности результата измерений учитывались величины, приведенные в таблице 2.

Таблица 2 – Перечень величин, влияющих на неопределенность результата

| Величина | Ед. изм. | Определение или описание | Примечание |
|--------------------|--|--|--|
| 1. $S_{\text{пр}}$ | м^2 | Площадь поверхности пробы | - |
| 1.1 Δl | м^2 | Поправка на погрешность измерительной линейки | Погрешность линейки взята по ГОСТ 427-75 |
| 2. τ | с | Время остывания нагревательного элемента | - |
| 2.1 Δs | с | Поправка на погрешность секундомера | Погрешность секундомера взята по ГОСТ 8.423-81 |
| 2.2 Δo | с | Поправка на субъективную погрешность оператора | Интервал взят исходя из цены деления секундомера |
| 3. m | кг | Масса нагревательного элемента | - |
| 3.1 Δm | кг | Поправка на погрешность весов | Погрешность весов взята по ГОСТ 24104-2001 |
| 4. ΔR | $\text{м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}$ | Неопределенность возникает при определении результата измерения как среднего арифметического по двум точечным пробам | |

В качестве входной величины не рассматривается удельная теплоемкость нагревательного элемента (c , Дж/кг·°C), так как значение этой величины берется из информационных справочников и таблиц.

В соответствии с методикой выполнения измерений были получены результаты измерений, представленные в таблице 3, и рассчитаны следующие статистические характеристики: среднее арифметическое значение ($\sigma_{\text{ср}} = 0,718$), среднее квадратическое отклонение ($S_x = 0,01$), стандартная неопределенность: $u_A(R_{\text{сум}}) = 0,007$.

Таблица 3 – Результаты измерений

| № обр. | № точ. пробы | Линейные размеры, м | $S_{\text{пр}}$, м^2 | c , Дж/кг·°C | m , кг | τ , с | $R_{\text{сум}}$, $\text{м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}$ |
|--------|--------------|---------------------|--------------------------------|----------------|----------|------------|---|
| 1 | 1 | 0,179x0,125 | 0,022 | 134 | 0,1297 | 562 | 0,711 |
| | 573 | | | | | 0,725 | |

Бюджет неопределенности представлен в таблице 4.

Таблица 4 – Бюджет неопределенности

| Величина X_i | Ед. измерений | Значение оценки, x_j | Интервал | Тип неопределенности | Вид распределения вероятностей | Стандартная неопределенность $u(x_i)$ | Кэфф. чувствительности, c_i | Вклад неопределенности | Процентный вклад, % |
|----------------|--|------------------------|---------------------|----------------------|--------------------------------|---------------------------------------|-------------------------------|------------------------|---------------------|
| ΔR | $\text{м}^2 \cdot \text{°C} / \text{Вт}$ | 0,718 | 0,01 | A | нормальное | 0,007 | - | 0,007 | 63,64 |
| Δl | м^2 | 0,022 | 0,0001 | B | равномерное | 0,0001 | 32,682 | 0,0033 | 30,0 |
| Δs | с | 568 | 0,6 | B | равномерное | 0,346 | 0,0013 | 0,0004 | 3,64 |
| Δo | с | 568 | 0,2 | B | равномерное | 0,116 | 0,0013 | 0,0002 | 1,82 |
| Δm | кг | 0,1297 | $0,1 \cdot 10^{-5}$ | B | равномерное | $0,06 \cdot 10^{-5}$ | 5,544 | $0,000003$ | 0,03 |

Определив коэффициенты чувствительности (на основе вычисления производных измеряемой величины по ее аргументам), рассчитаем суммарную стандартную неопределенность по формуле:

$$u_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^m c_i^2 u_i^2(x_i)} = \sqrt{\sum_{i=1}^m u_i^2(y)}, \quad (2)$$

где c_i – коэффициент чувствительности; u_i – стандартная неопределенность.

$$u_c(R) = \sqrt{(0,0097)^2 + (0,0001 \cdot 32,682)^2 + (0,365 \cdot 0,0013)^2 + (0,0000006 \cdot (-5,544))^2} = 0,01.$$

Расширенную неопределенность определяем путем умножения суммарной стандартной неопределенности на коэффициент охвата $k = 2$ (для интервала, имеющего уровень доверия 95 %): $U = 2 \cdot 0,01 = 0,02$.

Полный результат измерений представлен в следующей форме:

$$Y = y \pm U,$$

где y – оценка измеряемой величины Y , U – расширенная неопределенность.

$$Y = (0,718 \pm 0,020) \text{ м}^2 \cdot \text{°C} / \text{Вт}.$$

Таким образом, разработанная методика позволяет определять суммарное тепловое сопротивление с достаточно высокой точностью: относительная погрешность метода, δ_{cp} , составляет $\pm 5\%$, расширенная неопределенность измерений, U , составляет $\pm 0,020 \text{ м}^2 \cdot \text{°C} / \text{Вт}$ (при коэффициенте охвата 2 и вероятности охвата 0,95). Данные характеристики заложены в разделе МВИ «Показатели точности измерений».

Список использованных источников

- ГОСТ 8.010-2013 Государственная система обеспечения единства измерений. Методики выполнения измерений. Основные положения. – Введ. 2017-04-01. – Минск: Бел-ГИСС, 2017. – 20 с.