

**Моисеева Н.П.**

## **ИНДИВИДУАЛЬНАЯ ГРАДУИРОВКА ТЕРМОМЕТРОВ СОПРОТИВЛЕНИЯ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ РАЗНОСТИ ТЕМПЕРАТУР**

Измерение разности температур в двух точках объекта – одна из важнейших и широко распространенных в промышленности метрологических задач. Эта задача связана, прежде всего, с системами теплоснабжения, в которых необходимо определить количество потребляемой тепловой энергии на основании измерения расхода теплоносителя и разности температур входящего и выходящего потока теплоносителя. От точности определения разности температур зависит экономическая эффективность теплоснабжения и энергосбережения. В данной статье рассматриваются методы калибровки пар термометров для измерения разности температур в приборах учета тепла с целью получения минимальной неопределенности результата при наименьших экономических затратах на поверку термометров.

Неопределенность измерения разности температур на объекте с помощью двух промышленных платиновых термометров сопротивления (ТС) зависит от неопределенности градуировки каждого термометра и от условий работы термометров, т.е. от теплообмена чувствительного элемента (ЧЭ) термометров со средой. При использовании двух произвольных термометров со стандартной градуировкой НСХ по ГОСТ Р 8.625-2006 [1] и МЭК 60751 (2008) [2] разность температур может отклоняться от действительного значения на сумму допусков термометров. Например, если взять термометры класса А, то при измерении разности  $160\text{ }^{\circ}\text{C} - 30\text{ }^{\circ}\text{C}$ , получим предельную погрешность  $0,47 + 0,21 = 0,68\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Чтобы снизить погрешность разности температур, проводят индивидуальную

градуировку ТС и значение температуры рассчитывают не по НСХ, а по индивидуальной зависимости сопротивления от температуры  $R(t)$ .

Возможными видами индивидуальных функций для ТС являются уравнение Каллендара Ван Дюзена (КВД) и методика МТШ-90. Оба метода подробно описаны в приложении к ГОСТ Р 8.624-2006 [3]. Метод МТШ-90 предполагает использование выше  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  стандартного полинома 9 степени и функции отклонения. Он реализован в некоторых вторичных приборах, в основном эталонного уровня точности. Как правило, для промышленных термометров, используемых в системах теплоснабжения, этот метод не применяется. Самым распространенным и простым методом интерполяции для рабочих ТС является уравнение Каллендара Ван Дюзена, которое в диапазоне выше  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  представляет собой квадратичный полином с тремя индивидуальными коэффициентами  $R(0)$ ,  $A$ ,  $B$ , вычисляемыми при калибровке:

$$R(t) = R(0) (1 + At + Bt^2), \quad (1)$$

где  $t$  – значение измеряемой температуры в  $^{\circ}\text{C}$ .

Методы получения коэффициентов  $R(0)$ ,  $A$ ,  $B$  могут быть разными [5-7]. Следует отметить, что индивидуальная градуировка рабочих ТС имеет смысл, только если нестабильность ТС достаточно высока и если вторичный преобразователь позволяет использовать для вычисления температуры индивидуальные коэффициенты.

Очень часто возможности работать с индивидуальными характеристиками термометров нет. Во вторичный прибор, так называемый тепловычислитель, введены стандартные коэффициенты функции КВД по стандарту МЭК 60751 и по НСХ ГОСТ Р 8.625-2006. Можно ли в этом случае получить погрешность

разности температур меньше, чем сумма допусков рабочих ТС по вышеназванным стандартам?

Если вычислять погрешность разности температур, измеренной с помощью двух термометров, подключенных к прибору, преобразующему сигнал с помощью стандартной НСХ и при этом учитывать отклонение индивидуальной характеристики  $R(T)$  термометров от НСХ, то формула для погрешности будет следующей:

$$\Delta_{12} = ((T_{u1}(R_1) - T_{u2}(R_2)) - ((T_n(R_1) - T_n(R_2))), \quad (2)$$

где:

$T_{u1}(R_1)$ ,  $T_{u2}(R_2)$  – температуры, определенные по индивидуальным градуировочным функциям для первого и второго термометров;

$T_n(R_1)$ ,  $T_n(R_2)$  – температуры, определенные по стандартной градуировочной функции (НСХ) для первого и второго термометров.

Перед предприятиями, выпускающими комплекты термометров для измерения разности температур, стоит задача подобрать пары термометров так, чтобы минимальной оставалась разность (2). Причем, учитывая, что пар много, желательно выбрать наиболее экономичный метод подбора пар. Следует отметить, что предположение о том, что чем ближе друг к другу индивидуальные функции термометров пары, тем меньше погрешность разности температур не справедливо. Из формулы (2) следует, что погрешность будет определяться фактически не близостью индивидуальных функций, а близостью отклонений этих функций от НСХ.

Согласно международному стандарту EN 1434-5:1997 (ГОСТ Р EN 1434-5-2006) [4] погрешность разности температур в зависимости от величины разности должна находиться в следующих пределах:

$$\Delta_{12} = \pm (0.5 + 3 \times \Delta\theta_{\min} / \Delta\theta) \Delta\theta / 100 \text{ } ^\circ\text{C}, \quad (3)$$

Таким образом, при минимальной разности температур  $\Delta\theta_{\min} = 3 \text{ } ^\circ\text{C}$  погрешность не должна превышать  $\pm 0,14 \text{ } ^\circ\text{C}$  для разности  $\Delta\theta = 10 \text{ } ^\circ\text{C}$  и  $\pm 0,24 \text{ } ^\circ\text{C}$  для разности  $\Delta\theta = 30 \text{ } ^\circ\text{C}$ .

Рассмотрим четыре возможных метода получения индивидуальных коэффициентов зависимостей  $T_{и1}(R_1)$  и  $T_{и2}(R_2)$ :

1) Расчет коэффициентов  $R(0)$ ,  $A$ ,  $B$  по трем градуировочным точкам.

Этот метод считается самым точным. ТС градуируются методом сличения в жидкостном термостате с эталонным платиновым термометром. По трем сопротивлениям и соответствующим им температурам, полученным при градуировке, рассчитываются три коэффициента из решения системы уравнений вида (1). Большим недостатком является необходимость использования для градуировки термометров в диапазоне выше  $100 \text{ } ^\circ\text{C}$  масляного термостата, который требует вытяжной вентиляции. К тому же, при длительной и непрерывной работе с таким термостатом необходимо периодически менять масло, которое по стоимости почти сравнимо с термостатом. Поэтому данный метод является самым дорогим.

2) Расчет  $R(0)$  и  $A$  по результатам градуировки в двух градуировочных точках вблизи температур  $0$  и  $100 \text{ } ^\circ\text{C}$  с использованием стандартного коэффициента  $B$ .

Формулы для расчета следующие:

$$A = \frac{r_2 - r_1 + B \cdot (r_2 \cdot t_1^2 - r_1 \cdot t_2^2)}{t_2 \cdot r_1 - t_1 \cdot r_2} \quad (4)$$

$$R_0 = \frac{r_1}{1 + A \cdot t_1 + B \cdot t_1^2}, \quad (5)$$

где:  $r_1$ ,  $t_1$  –сопротивление ТС и температура, определенная по эталонному термометру в точке вблизи 0 °С;

$r_2$ ,  $t_2$  –сопротивление ТС и температура, определенная по эталонному термометру в точке вблизи 100 °С;

$B$  – коэффициент функции НСХ по ГОСТ 8.625-2006 (МЭК 60751).

Этот метод самый грубый, но самый простой и дешевый. Необходим только сосуд с льдо-водяной смесью и водяной термостат. Возможность применения такого метода обоснована тем, что коэффициент  $B$  для термометров с ЧЭ пленочного типа имеет малое значение ( $-5,775 \times 10^{-7}$ ) и он хорошо воспроизводится [7]. Ограничение точности метода заключается в том, что коэффициент  $B$  в МЭК 60751 получен из экспериментов с платиновыми термометрами в диапазоне 0-650 °С [8]. Поскольку реальная зависимость  $R(t)$  для платины отклоняется от полинома второй степени, значение  $B$  в диапазоне 0-150 °С ниже чем в диапазоне 0-650 °С. Кроме того, значения  $B$  для термометров с пленочным ЧЭ как правило отличаются от значений для проволочных ТС [5].

3) Расчет  $R(0)$  и  $A$  по точкам 0 и 100 °С с использованием коэффициента  $B$ , близкого к реальному для данного типа термометров.

Этот метод отличается от предыдущего только тем, что в расчетах используется коэффициент  $B$ , характерный для определенной партии термометров. Метод особенно успешно может применяться для термометров с пленочным ЧЭ, т.к. благодаря автоматизированной технологии изготовления пленочных ЧЭ, коэффициенты партии термометров очень близки по величине. Требуется определить значение коэффициента  $B$  для выборки термометров и затем распространить полученное значение на всю партию. Данный метод фактически снимает ограничение по точности, характерное для предыдущего метода и в то же время он является очень экономичным, как по трудозатратам (две градуировочные точки вместо трех), так и по расходным материалам (вода вместо масла).

4) Расчет коэффициентов  $R(0)$ ,  $A$ ,  $B$  по отклонению от стандартной функции МТШ-90 в точке  $100\text{ }^\circ\text{C}$ . Этот метод обоснован в работах [4, 5]. Метод заключается в построении по двум градуировочным точкам линейной функции отклонения от квадратичного полинома, аппроксимирующего функцию МТШ-90 в узком диапазоне температур.

Формулы для расчета коэффициентов индивидуальной интерполяционной зависимости  $W(t) = I + A_u t + B_u t^2$  по одной градуировочной точке следующие:

$$A_u = (I + a) A_{90}; \quad B_u = (I + a) B_{90} \quad (6)$$

$$a = [W(t_2) - W_{90}(t_2)]/[W_{90}(t_2) - I] \quad (7)$$

где:

$W(t_2)$  – результат градуировки термометра в точке градуировки  $t_2$   $W(t_2) = R(t_2)/R(0)$ ;

$W_{90}(t_2)$  – значение стандартной функции при температуре  $T_2$ :  $W_{90}(t_2) = I + A_{90} t_2 + B_{90} t_2^2$

Необходимо отметить, что значения  $A_{90}$ ;  $B_{90}$  – разные для разных поддиапазонов. Идея метода в том, что мы фактически приближаем функцию КВД к МТШ-90. Метод тем точнее, чем уже диапазон температуры. Точность данного метода достаточно высокая для проволочных ЧЭ, но для пленочных ЧЭ, интерполяционная функция которых может отличаться от МТШ-90, данный метод может дать ошибочный результат.

Проанализируем возможность использования различных методов получения индивидуального уравнения интерполяции на примере конкретной пары термометров. Пара состоит из двух термометров с пленочным ЧЭ. Данные градуировки при трех температурах и полученные коэффициенты  $A$  и  $B$  приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Результаты градуировки двух пленочных термометров сопротивления в точках, близких к 0, 100, 150 °С и рассчитанные по трем градуировочным точкам коэффициенты КВД.

$T_2, ^\circ\text{C}$	0,00074	99,46676	149,59771	<i>A</i>	<i>B</i>
$R1, \text{Ом}$	100,0206	138,3601	157,2030	$3,91598 \cdot 10^{-3}$	$-6,39182 \cdot 10^{-7}$
$R2, \text{Ом}$	100,0328	138,3636	157,2028	$3,917452 \cdot 10^{-3}$	$-6,40374 \cdot 10^{-7}$

Индивидуальные коэффициенты *A* и *B* и соответствующие им зависимости  $T_{и1}(R_1)$  и  $T_{и2}(R_2)$  можно также получить вышеописанными методами с применением только двух градуировочных точек.

Погрешность измеренной тепловычислителем разности температур рассчитывают по формуле (2), как разность значений по НСХ и значений, полученных с помощью индивидуальной характеристики. Вообще говоря, для оценки погрешности во всем рабочем диапазоне температур пары термометров необходимо перебрать всевозможные значения температур «холодного» и «горячего» термометров, как это рекомендуется в ГОСТ ЕН 1434. В данной работе мы ограничимся расчетом погрешности для двух разностей температур «холодного» и «горячего» термометра: 10 °С и 30 °С. Диапазон изменения температуры для «холодного» термометра 0 – 120 °С. Графики погрешности приведены на рис.1, 2. Для проверки взаимозаменяемости термометров в паре графики были получены для случая, когда «холодным» является термометр №1 (сплошная линия) и когда «холодным» является термометр №2 (пунктирная линия).

**Рис. 1. Погрешность измерения разности температур в зависимости от температуры «холодного» термометра. Разность температур «холодного» и «горячего» термометра 30 °С. Значения по обеим осям в °С.**

Рис. 1-а Три точки градуировки

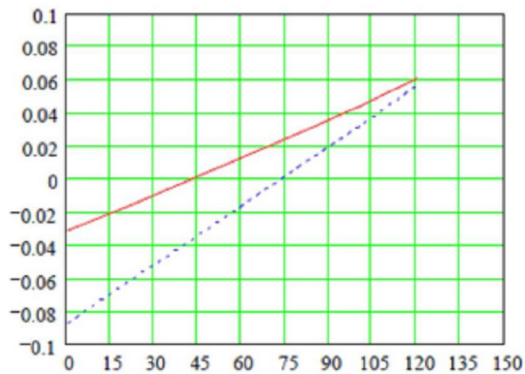


Рис. 1-б Две точки градуировки, стандартный коэф В

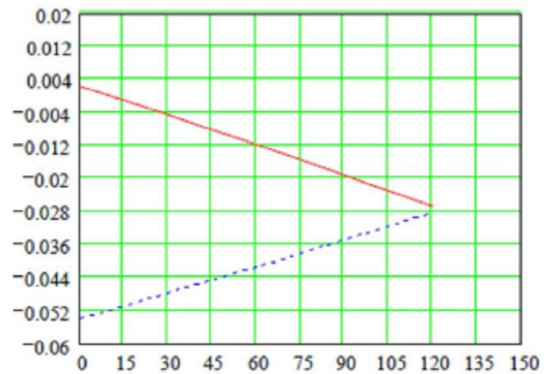


Рис. 1-в Две точки градуировки, индивидуальный коэф В

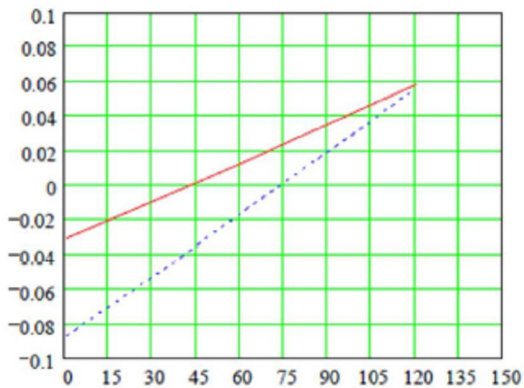
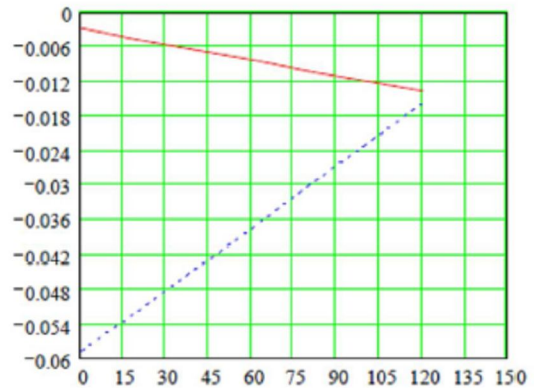


Рис. 1-г Две точки градуировки, по отклонению от МТШ-90





**Рис. 2. Погрешность измерения разности температур в зависимости от температуры «холодного» термометра. Разность температур «холодного» и «горячего» термометра 10 °С. Значения по обеим осям в °С.**

Рис. 2-а Три точки градуировки

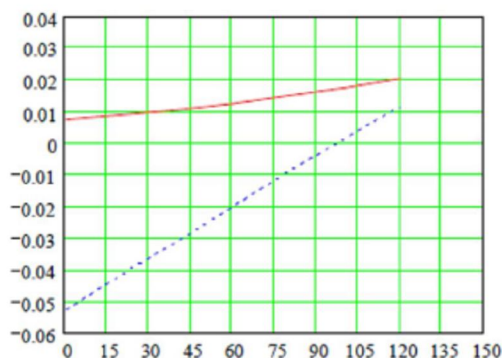


Рис. 2-б Две точки градуировки, стандартный коэф В

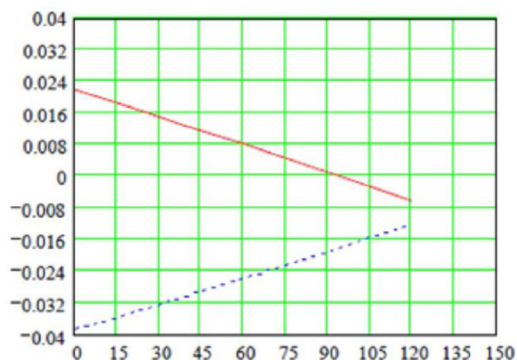


Рис. 2-в Две точки градуировки, индивидуальный коэф В

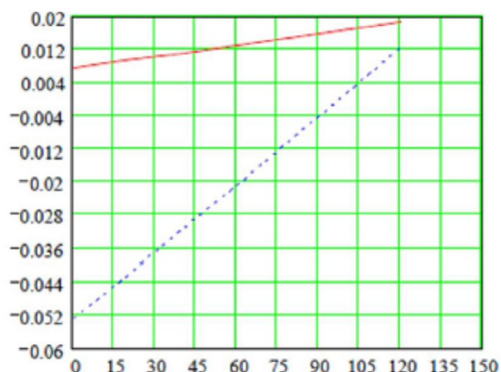
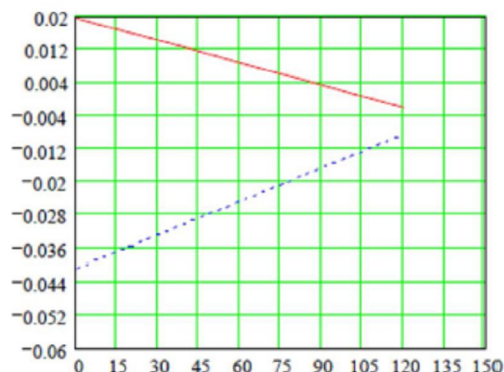


Рис. 2-г Две точки градуировки, по отклонению от МТШ-90



Для выбранной пары ТС погрешности не превышают 0,1 °С и, таким образом, хорошо укладываются в допустимые по формуле (3) значения при любом методе построения интерполяционной зависимости. Графики погрешностей при перемене местами «холодного» и «горячего» термометров изменяется, поэтому для повышения точности целесообразно маркировать термометры при изготовлении и подбирать пары уже с учетом маркировки. Следует отметить, что

это является обычной практикой на предприятиях, производящих комплекты термометров для измерения разности температур.

Сравнительный анализ точности методов можно провести, приняв в качестве опорных графики на рис. 1-а и 2-а, полученные методом градуировки термометров по трем точкам. Из упрощенных методов ближе всех к зависимости, построенной по трем точкам, метод, в котором применяется индивидуальное значение коэффициента  $B$ , характерное для данного типа термометров. Это не удивительно, поскольку для данных пленочных термометров различие между стандартным коэффициентом  $B$  по НСХ и индивидуальным довольно существенное. Как уже отмечалось, технология изготовления пленочных ТС позволяет достичь высокой воспроизводимости коэффициентов зависимости  $R(t)$ . Однако, как правило, сами коэффициенты могут существенно отличаться от стандартных. Ограниченный объем данной статьи не позволяет провести подобный анализ для пары проволочных или пленочных термометров с коэффициентом  $B$ , близким к НСХ. Однако на основании полученных графиков следует ожидать, что все методы, описанные в статье, будут давать очень близкие результаты.

## **Вывод**

Методика подбора пар термометров для измерения разности температур требует тщательного обоснования как с метрологической, так и с экономической точки зрения. Эта методика фактически является частью технологического процесса изготовления комплектов термометров, используемых в узлах учета тепловой энергии. Учитывая, что в энергетической отрасли используется огромное количество теплосчетчиков, любое упрощение метода подбора пар может дать существенный экономический эффект.

В работе приводятся четыре возможных метода подбора пар термометров. Показано, что методика может быть основана на исследовании индивидуальных коэффициентов, характерных для партии ТС, что особенно важно, если термометры комплекта изготовлены с использованием пленочного платинового чувствительного элемента.

## Литература

1. ГОСТ Р 8.625-2006 «ГСИ. Термометры сопротивления из платины, меди и никеля. Общие технические требования и методы испытаний»
2. МЭК 60751 (2008) «IEC 60751 (2008) Industrial platinum resistance thermometers and platinum temperature sensors»
3. ГОСТ Р 8.624-2006 «ГСИ. Термометры сопротивления из платины, меди и никеля. Методика поверки»
4. ГОСТ Р ЕН 1434-5-2006 «Теплосчетчики. Часть 5. Первичная поверка»
5. Moiseeva, N. P., "Investigation of  $W(T)$  Functions for Low- $\alpha$  PRTs in the Sub-ranges above 0 °C", in Temperature: Its Measurement and Control in Science and Industry, Vol. 7, edited by D. C. Ripple et al., AIP Conference Proceedings, Melville, New York, 2003, p. 333-338.
6. Н.П. Моисеева «ИССЛЕДОВАНИЕ ИНТЕРПОЛЯЦИОННЫХ ЗАВИСИМОСТЕЙ ДЛЯ ТСП В УЗКИХ ДИАПАЗОНАХ ТЕМПЕРАТУР»  
Измерительная Техника 2004 г № 11, стр. 39-43
7. Моисеева Н.П. «Неопределенность значения температуры, измеренной платиновым термометром сопротивления», Приборы №12, 2002, стр. 30-34

8. Crovini, A. Actis, G. Coggiola, A. Mangano.,“Precision calibration of Industrial Platinum Resistance Thermometers”, in *Temperature: Its Measurement and Control in Science and Industry*, Vol. 6, New York, AIP, 1992, pp. 1077-1082.