

**Достоверность измерения
температуры термоэлектрическими
преобразователями и методика их
периодической поверки.**

А.В. Белевцев, Главный метролог

А.В. Каржавин, Директор

В.А. Каржавин, Инженер-исследователь

Производственная компания «Тесей», г. Обнинск.

Явление Зеебека

Метод измерения температуры с помощью термопары основан на явлении Зеебека: в электрической цепи, состоящей из последовательно соединённых различных проводников, возникает электрический ток, если в местах контактов поддерживается различная температура. Упрощенно для понимания физической основы, возникновение термо-э.д.с. в металлах и сплавах можно объяснить на основе теории электронного газа П. Друде.

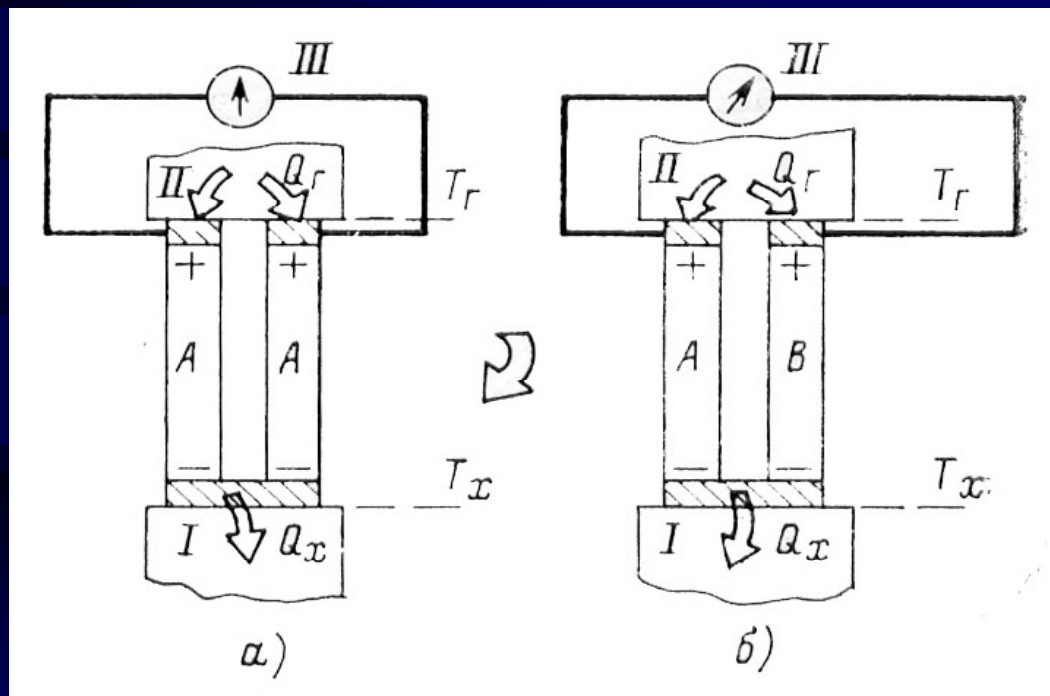


Схема иллюстрирующая эффект Зеебека. *а* – одинаковые проводящие стержни; *б* – разные проводящие стержни; *I* – теплоприемник с температурой T_x ; *II* – теплоотдатчик с температурой T_g ; *III* – измерительный прибор.

Явление Зеебека

Величина ТЭДС вырабатываемая однородным участком проводника А, равна:

$$E_A(T) = \int_{T_1}^{T_2} S_A(T) dT \quad (1)$$

Откуда понятно, что локальная чувствительность такого участка равна:

$$S_A(T) = \lim_{\Delta T \rightarrow 0} \frac{\Delta E(T)}{\Delta T} = \frac{dE}{dT} \quad (2)$$

Формула (2) выражает абсолютный коэффициент Зеебека локального участка, *физическое свойство всех электропроводящих материалов*, которое не зависит от наличия любого другого материала в цепи.

Зависимость ТЭДС от температуры для термопары, состоящей из изотропных термоэлектродов, представляется в интегральном виде:

$$E_{AB} = \int_{T_1}^{T_2} S_{AB}(T) dT \quad (3)$$

Коэффициент Зеебека пары проводников АВ представляет собой разность коэффициентов Зеебека материала А и материала В:

$$S_{AB} = S_A - S_B \quad (4)$$

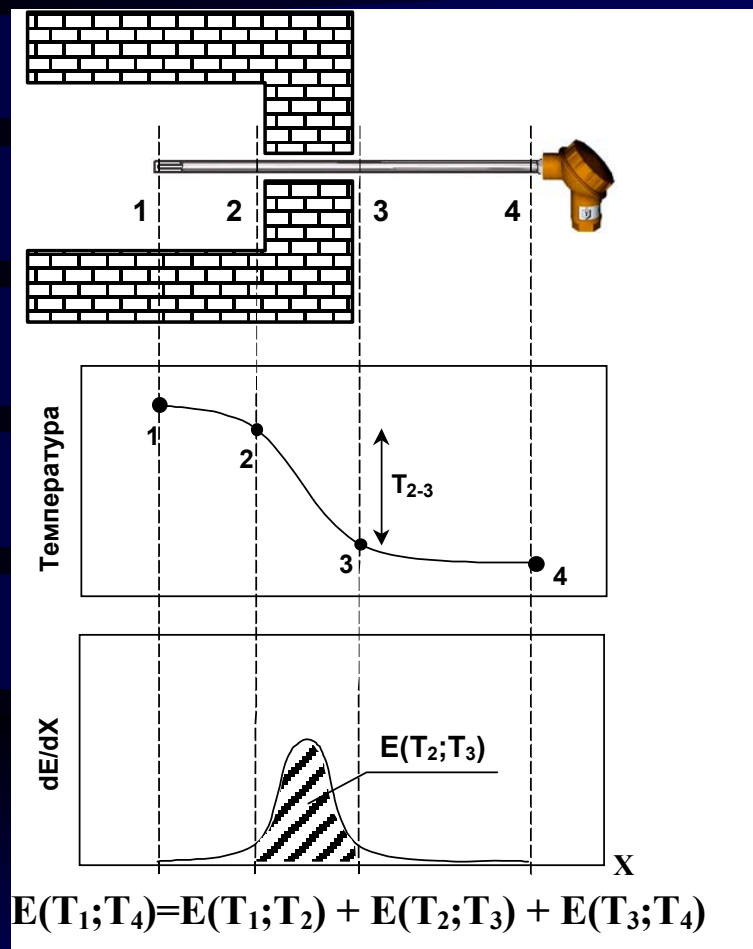
Неоднородность

На практике электроды термопар на разных участках своей длины имеют неодинаковый коэффициент ТЭДС. Это проявление неоднородности физических свойств реальных материалов и сплавов, обусловленной колебаниями их состава и структуры, получило название термоэлектрической неоднородности (ТЭН) [2].

Неоднородность может возникнуть в любое время в процессе использования термопары.

Любой неоднородный термоэлектрод можно рассмотреть как цепь нескольких локально однородных участков произвольной длины и с заданными температурами на концах. В этом случае напряжение, возникающее на концах термопары, – это сумма ТЭДС от всех участков с различной температурой на концах. Участки с постоянной температурой не генерируют ТЭДС.

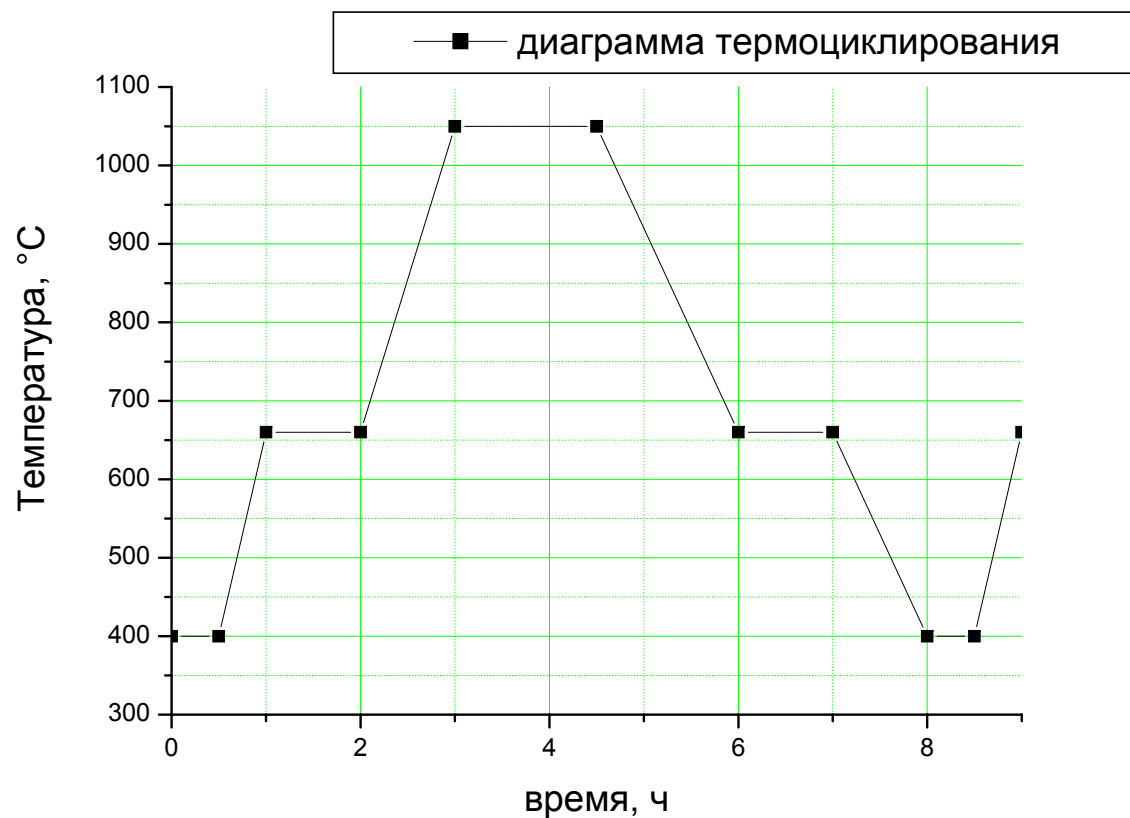
$$E_{AB}(T_1, T_N) = E_{AB}(T_1, T_2) + E_{AB}(T_2, T_3) + \dots + E_{AB}(T_{N-1}, T_N) \quad (5)$$



Поверка по ГОСТ 8.338-2002 при глубине погружения 250-300 мм и её результаты будут действительны только для этой глубины погружения, при этом термопары в условиях эксплуатации помещаются в печь на 500мм и более. Участок основного градиента температур, как правило, приходящегося на часть термопары, расположенную в зоне футеровки печи. Что иллюстрирует рисунок. Следовательно, участок длиной 250-300 мм находится в зоне практически равномерной температуры и генерируемая на нём величина термо-э.д.с. значительно меньше чем генерируемая на переходном участке.

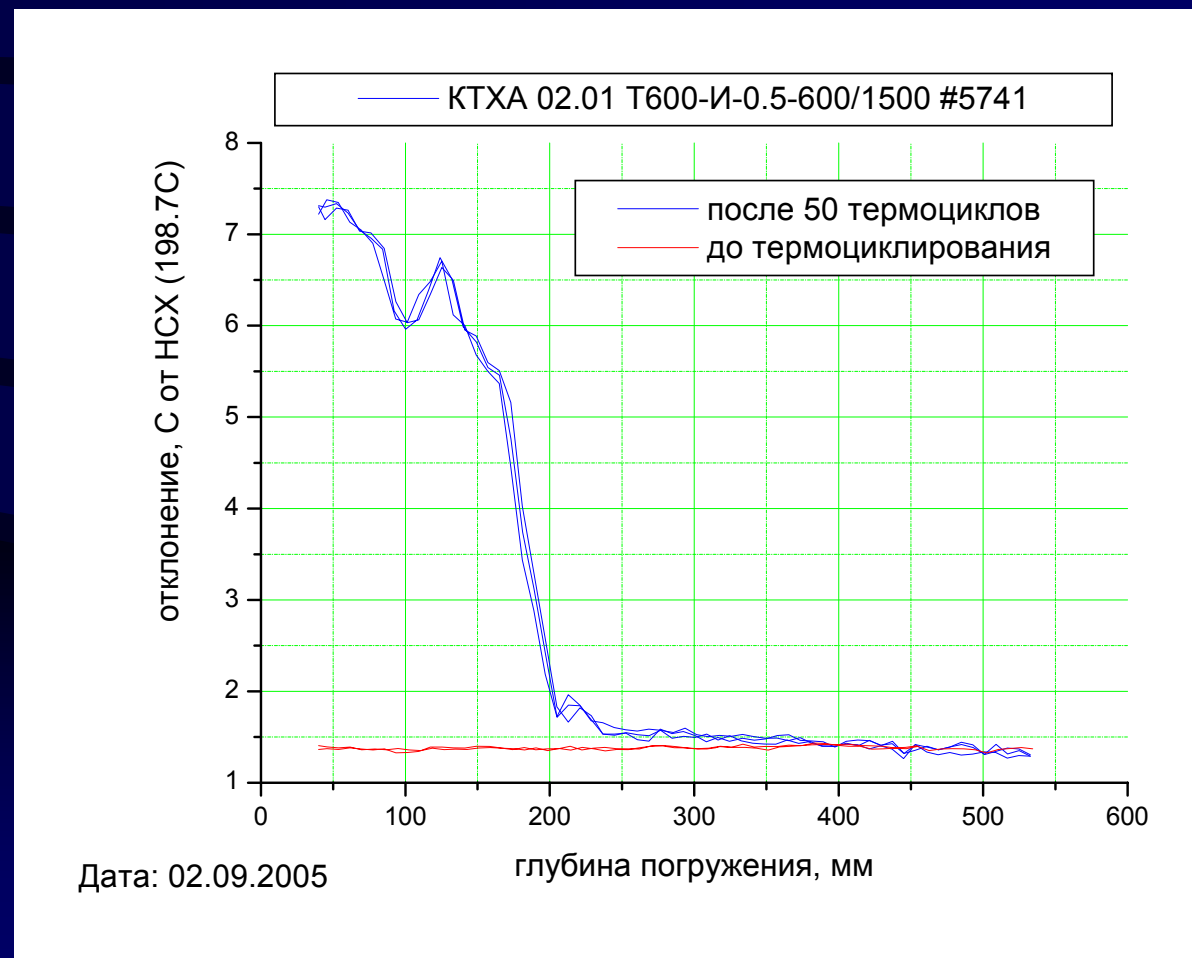
Результаты исследований

Представлены результаты исследования однородности кабельных термопар диаметром 3мм типов КТНН и КТХА, а также КТХА диаметром 0,5мм до и после циклического воздействия на них температуры. Термоциклирование производилось при глубине погружения 250 мм согласно приведенной схеме.



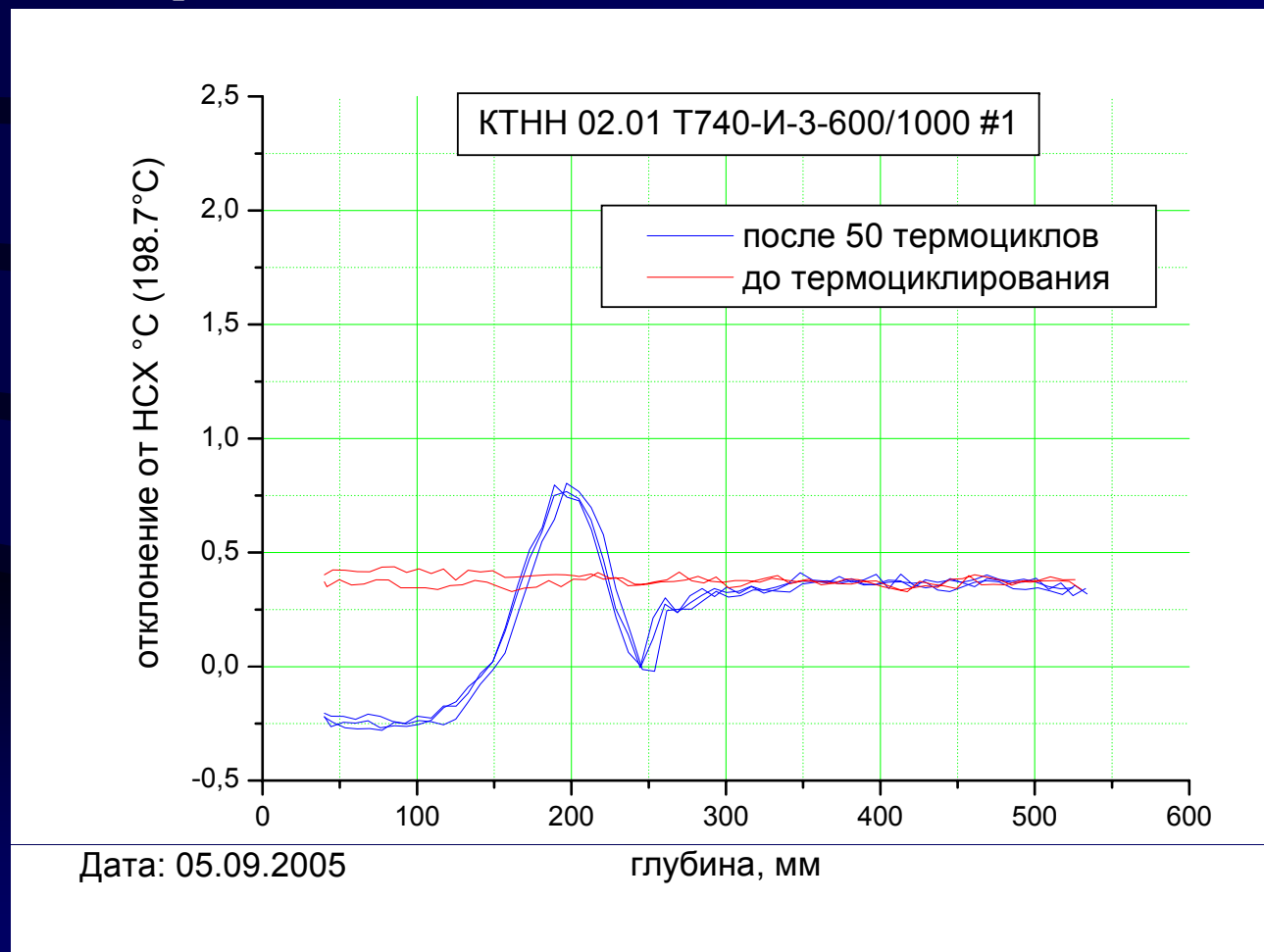
Результаты исследований

Термопара, помещенная в печь на большую глубину, чем при поверке, будет давать показания ближе к истинным, а результат поверки нельзя учитывать в качестве поправки к её показаниям. Тем более нельзя применять ранее использовавшуюся термопару на глубине погружения меньшей той, при которой проводилась поверка.



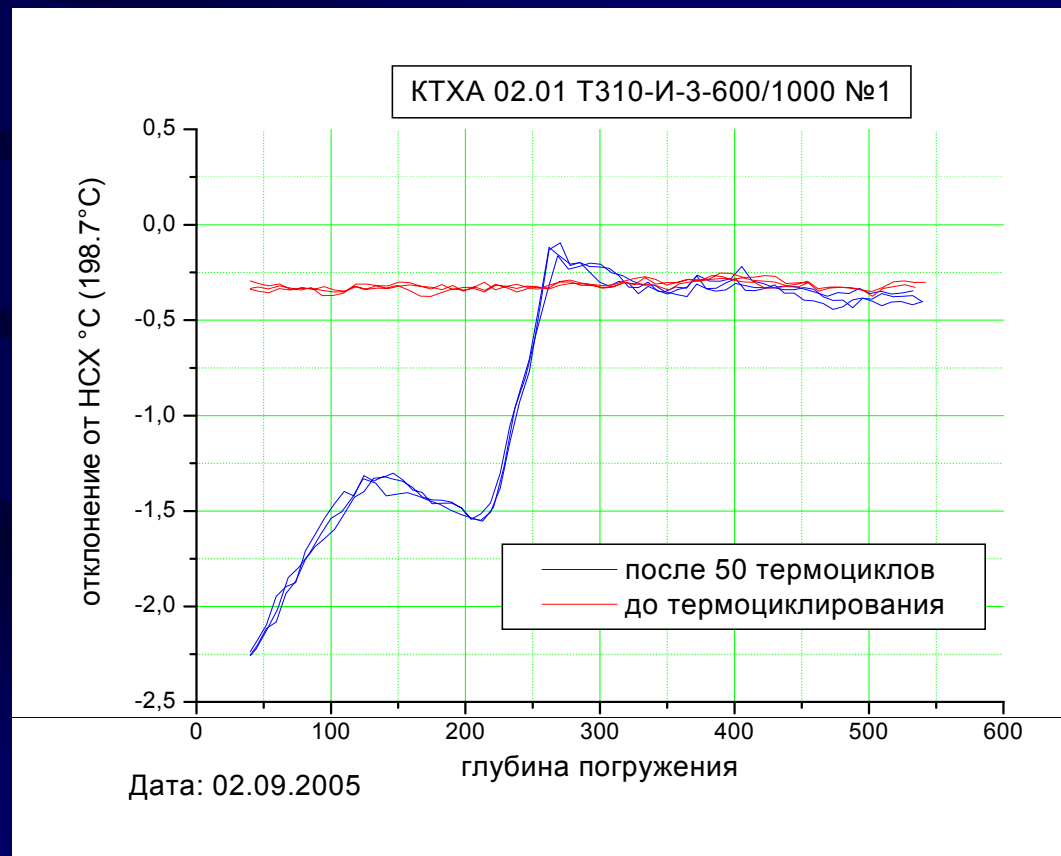
Результаты исследований

После термоциклирования разница в показаниях в зависимости от глубины погружения для термопары типа ХА диаметром 3 мм составила 2°C , для термопары диаметром 0.5 мм 6°C , для термопары типа НН диаметром 3 мм 0.5°C .



Результаты исследований

Приведенные результаты исследований наглядно демонстрируют проявление ТЭН и подтверждают тезис о том, что только поверка изначально однородной термомпары, не бывшей в эксплуатации, может быть проведена с высокой точностью и независимо от профиля температурного поля и глубины погружения. Результат же градуировки неоднородной термомпары есть частный случай, зависящий от глубины погружения и профиля температурного поля в котором она проводилась.



Стандарты

В ASTM International E220-02, регламентирующем калибровку ТП методом сравнения, вообще не рассматривается возможность калибровки ранее эксплуатировавшихся ТП, в частности п6.3 гласит: «В основе метода лежит предположение о том, что калибруемые термоэлектроды однородны. Если это предположение верно, то их выходное напряжение при заданной температуре горячего спая не зависит от изменений температуры по длине термопары. Отклонения от этой идеализированной ситуации вносят вклад в погрешность при использовании результатов испытания. Это влияние обычно пренебрежительно мало для нового, не бывшего в употреблении материала термопары, в отличие от уже использовавшихся термопар, особенно изготовленных из неблагородного металла.»

Стандарты

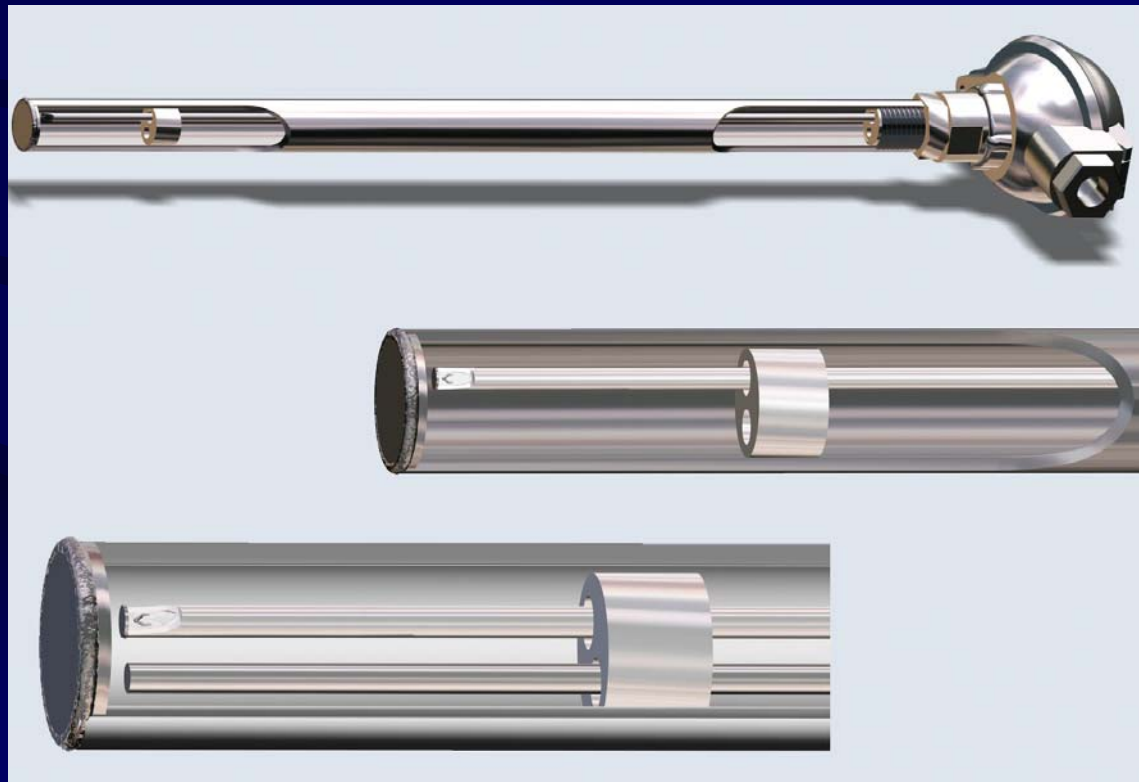
Пункт 15.6 стандарта E220 *Точность используемых откалиброванных термопар* разъясняет: «Строго говоря, калибровки с помощью описанных здесь методов применимы только для условий эксплуатации, подобных тем, при которых они проводились. После того, как термопара, особенно из цветных металлов, была нагрета до высокой температуры, могут произойти изменения даже в относительно однородных термоэлектродах, что приведет к тому, что показания ЭДС термопары будут зависеть от конкретного профиля температуры, существующего между горячим и холодным спаями. Это особенно верно для термопар из цветных металлов, которые были откалиброваны на одной глубине погружения, а используются при меньшей глубине. Общую количественную оценку погрешностей, которые могут появиться от этого источника, выполнить невозможно, но необходимо допускать возможность возникновения таких погрешностей при анализе погрешностей измерений температуры с помощью откалиброванных термопар из цветных металлов. Для термопар из цветных металлов желательно сначала откалибровать партию проводов термопар или статистическую выборку из числа собранных термопреобразователей, а затем использовать новую термопару или термопреобразователь для каждого температурных условий».

Разработки

Так как периодическая поверка имеет смысл лишь тогда, когда проводится в тех же условиях, что и эксплуатационные, а их невозможно воспроизвести в лабораторных условиях, мы предлагаем производить калибровку термопар непосредственно на месте их эксплуатации. Для этого нашей компанией были разработаны две конструкции термоэлектрических преобразователей КТХА 11.06 и ТППТ 11.20,

предусматривающие возможность установки эталонной термопары рядом с рабочим чувствительным элементом без демонтажа термопреобразователя с объекта, позволяющие проводить сравнение показаний рабочей и эталонной термопар, т.е. проводить бездемонтакжную калибровку.

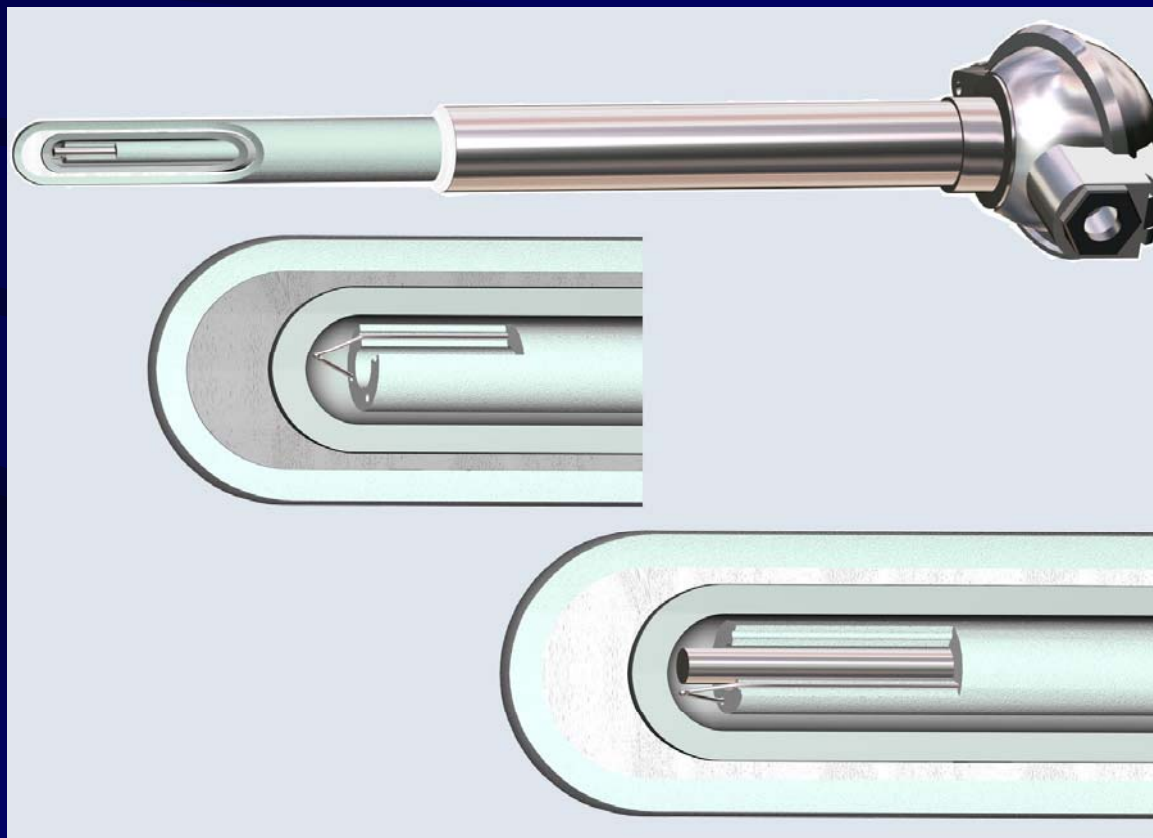
КТХА 11.06



Разработки

В качестве эталонных термопар мы предполагаем использовать кабельные термоэлектрические преобразователи КТННЭ и КТПЭЭ конструкции которых защищены патентами на полезную модель № 39200 "Эталонный термоэлектрический преобразователь" и № 39704 "Платиновый эталонный термоэлектрический преобразователь".

ТППТ 11.20



Разработки

Для того чтобы корректно измерять реальную температуру эталонными термопарами, необходимо производить их регулярную градуировку, а также в обязательном порядке периодически исследовать возникающую ТЭН, так как только с учётом результатов такого исследования можно быть уверенным в достоверности показаний термопары при любой глубине погружения в произвольном температурном поле.

Стандарт МЭК 60751

4.1.1. Сопротивления

Величины допустимых отклонений сопротивлений классифицированы в таблице 2. Эти отклонения применимы к сопротивлениям с любой величиной R_0 . В тех случаях, когда установленный температурный диапазон отдельно взятого термометра ниже указанного в таблице, он должен быть назначен .

Table 2: Классы точности сопротивлений.

Значение отклонения	Для проволочных сопротивлений		Для пленочных сопротивлений	
	Класс точности	Температурный диапазон	Класс точности	Температурный диапазон
$\pm(0.1 + 0.0017 t)^1$	W 0.1	-50 до +250	F 0.1	-50 до +250
$\pm(0.15 + 0.002 t)^1$	W 0.15	-100 до +450	F 0.15	-50 до +450
$\pm(0.3 + 0.005 t)^1$	W 0.3	-196 до +661 ²	F 0.3	-50 до +600
$\pm(0.6 + 0.01 t)^1$	W 0.6	-196 до +661 ²	F 0.6	-50 до +600

Примечание 1. $|t|$ = модуль температуры без учета знака.

Примечание 2. Величины выбраны по точке кипения азота и точки кристаллизации алюминия.

4.1.2. Термометры

Значение допустимых отклонений сопротивления термометров приведены в Таблице 3. Эти отклонения применимы для термометров с любым значением R_0 . Если, указанный температурный диапазон отдельно взятого термометра меньше указанного в таблице, он должен быть назначен.

Table 3: Классы точности термометров.

Класс точности	Значение отклонений (°C)	Температурный диапазон
AA	$\pm(0.1 \text{ °C} + 0.0017 t)^1$	-50 °C до +250 °C
A	$\pm(0.15 \text{ °C} + 0.002 t)^1$	-100 °C до +450 °C
B	$\pm(0.3 \text{ °C} + 0.005 t)^1$	-196 °C до +600 °C
C	$\pm(0.6 \text{ °C} + 0.01 t)^1$	-196 °C до +600 °C

Примечание 1: $|t|$ = Модуль температуры без учета знака.

Примечание 2: Диапазон достоверности отклонений для термометров с пленочными сопротивлениями ограничивается величинами приведенными в Таблице 2.

4.1.3. Дополнительные классы точности

Отклонения и диапазоны достоверности отличающиеся от приведенных в Таблицах 2 и 3 должны быть согласованы между производителем и потребителем. Рекомендованные дополнительные классы точности образуются как кратные части или дробь величины класса точности В. Дополнительные классы точности не имеют силы без указания температурного диапазона. Право установления классов точности для своих термометров или сопротивлений в температурном диапазоне, лежащем вне диапазонов приведенных в Таблицах 2 и 3 принадлежит производителю и потребителю.

Дополнительные классы точности также могут быть установлены для ограниченного или расширенного температурных диапазонов, т.е. для диапазонов температур от $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$ или от $661\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $850\text{ }^{\circ}\text{C}$.

5.2. Контрольные заводские испытания сопротивлений

Проверка соответствия классу

Все типы сопротивлений должны быть проверены как минимум на одной температуре. Температура в ходе испытаний должна быть в диапазоне от -5°C до $+30^{\circ}\text{C}$, желательно 0°C .

Сопротивления, соответствующие классу 0.15 или лучше должны быть проверены еще как минимум при одной температуре. Температура испытаний должна быть выше или ниже температурного предела сопротивления, или отличаться от первой температуры испытаний как минимум на 90°C , какой бы малой она не была.

Производитель должен гарантировать, что величина сопротивления находится внутри установленного класса точности. При выборе сопротивления, должна учитываться погрешность измерений. Пример показан на Рисунке 2: Если измерения проводит производитель, то только сопротивление №1 будет находиться внутри класса. Если измерения проводит потребитель, то только сопротивление №4 будет забраковано.

Поэтому:

Критерий отбора для производителя это: Результат испытаний, выраженный как температурное отклонение, при добавлении к соответствующим отклонениям, должен полностью находиться внутри поля допуска.

Критерий выбраковки для потребителя это: если результат теста, выраженный как температурное отклонение, при добавлении к дополнительной неопределенности полностью находится вне поля допуска.

Рисунок 2:

Пример результата теста для выбора или отбраковки сопротивления. В каждом результате испытаний указывается погрешность ($K=2$). Полагается, что измеренная производителем и потребителем погрешность будет одинакова



Проверка соответствия классу термометров

Производитель должен гарантировать, что в производстве использовались сопротивления соответствующего класса точности. Термометры класса точности А и выше (смотри параграф 4.1 данного стандарта) должны быть проверены на соответствие сопротивления при одной температуре в диапазоне от -5°C до $+30^{\circ}\text{C}$. Критерий приемки и выбраковки те же самые, что и описанные в пункте 5.2.1 настоящего стандарта.

Таблица 5: Таблица тестов, необходимых в соответствии с данным стандартом.

Тест	Контрольные заводские испытания		Стандартные испытания		Дополнительные типы тестов
	сопротивление	термометры	сопротивление	термометры	
Класс точности сопротивления	5.2.1	5.3.4	5.4.1	5.3.4	
Сопротивление изоляции при комнатной температуре		5.3.1		5.3.1	
Проверка целостности корпуса		5.3.2		5.3.2	
Проверка размеров		5.3.3		5.3.3	
Стабильность при верхнем температурном пределе			5.4.2	5.5.3	
Термоэлектрический эффект			5.4.3	5.5.4	
Самонагрев			5.4.4	5.5.7	
Сопротивление изоляции при комнатной температуре		5.3.1		5.3.1	
Сопротивление изоляции при высоких температурах				5.5.1	
Время термического срабатывания				5.5.2	
Эффект температурного циклирования				5.5.5	
Гистерезис				5.5.6	
Минимальная глубина погружения				5.5.8	
Емкостное сопротивление					5.6.1
Самоиндукция					5.6.2
Электрическая прочность					5.6.3
Виброустойчивость					5.6.4