

К вопросу о неопределенности измерений температуры термоэлектрическими преобразователями.

А.В. Белевцев, В.А. Каржавин, А.В. Каржавин
ООО «ПК «Тесей», г. Обнинск

Введение

Термоэлектрические преобразователи (в дальнейшем – термопары или ТП) часто используются при промышленных и лабораторных измерениях температуры. Это обусловлено возможностью их применения в широком диапазоне температур, а также удобством монтажа.

Как и любое измерение, измерение температуры с помощью ТП характеризуется степенью приближения результата к истинному значению.

Существуют два подхода к оцениванию параметров (характеристик) точности измерений. Один подход основан на понятиях и терминах теории неопределенности, другой – на понятиях и терминах теории погрешностей, которые пока более широко применяются в нормативных документах в области метрологии, используемых в российской системе обеспечения единства измерений.

В настоящее время в некоторые стандарты Российской Федерации, относящиеся к термометрии, введено понятие «неопределенность измерения» взамен термина «погрешность измерений».

Концепция «неопределенность измерений» получила всемирное распространение и введена как обязательное условие при аттестации поверочных лабораторий по международному стандарту ИСО/МЭК 17025.

Основные нормативные документы, касающиеся неопределенности измерений:

1. Руководство по оцениванию неопределенности в измерениях [1] (документ принят Международной Организацией по Стандартизации, Женева, 1993).

Целями Руководства являются:

- полная информации о том, как составлять отчеты о неопределенностях измерений;
- предоставление основы для международного сопоставления результатов измерений;
- предоставление универсального метода для выражения и оценивания неопределенности измерений, применимого ко всем видам измерений и всем типам данных, которые используются при измерениях.

2. РМГ 43-2001 ГСИ. Применение «Руководства по выражению неопределенности измерений» [2].

Эти Рекомендации распространяются на методы оценивания точности результатов измерений, содержат практические рекомендации по применению Руководства и показывают соответствие между формами представления результатов измерений, принятыми в нормативных документах по метрологии стран – участниках Соглашения, и формой, принятой в Руководстве.

3. ЕА-4/02 Выражение неопределенности измерения при калибровке [3].

Внедряемая в настоящее время в практику концепция «неопределенности измерения» позволяет достаточно легко рассчитывать неопределенность измерения как в производственных, так и в лабораторных условиях, и сравнивать результаты измерений, полученные в различных лабораториях. Знание же неопределенности проведенных измерений в производстве позволяет оптимизировать технологические процессы с большей точностью.

Целью данной работы является определение неопределенности измерения температуры термопарами при использовании различных измерительных схем.

1. Бюджет неопределенности измерений

На неопределенность результатов измерений температуры термопарами влияют многие факторы, основные из них это:

- неопределенность измерения термо-ЭДС регистрирующим прибором;
- класс допуска термопары;
- неопределенность калибровки термопары, т.е. определения её индивидуальной статистической характеристики (ИСХ);
- термоэлектрическая характеристика удлинительной линии, соединяющей термопару с регистрирующим прибором;
- изменение дифференциальной чувствительности (коэффициента Зеебека) термопары во времени (дрейф) и по длине, обусловленное возникновением и развитием термоэлектрической неоднородности (ТЭН).

Характеристики источников неопределенности измерения температуры термоэлектрическим преобразователем представлены в таблице 1. Бюджет неопределенности составлен в соответствии с Руководством [1] и нормативными документами [2, 3]. Для пояснения вкладов каждого из источников в суммарную неопределенность полезно привести выдержку из РМГ-43 [2], касающуюся неопределенностей типа В:

«Наиболее распространенный способ формализации неполного знания о значении величины заключается в постулировании равномерного закона распределения возможных значений этой величины в указанных (нижней и верхней) границах $[(b_{i-}; b_{i+})$ для i -й входной величины]. При этом стандартную неопределенность, вычисляемую по типу В – $u_B(x_i)$, определяют по формуле $u_B(x_i) = \frac{b_{i-} - b_{i+}}{2\sqrt{3}}$, а для симметричных границ $(\pm b_i)$ – по формуле $u_B(x_i) = \frac{b_i}{\sqrt{3}}$ » (где x_i – оценка i -й входной величины).

Бюджет неопределенности измерений

Таблица 1

Источник неопределенности	Обозначение	Тип и вид распределения неопределенности	Вклад в суммарную неопределённость
Случайные эффекты при измерении	$u_{СКО}$	тип А, нормальное распределение	$u_{СКО}$
Предел допускаемой основной погрешности регистрирующего прибора	$u_{прибора}$	тип В, равномерное симметричное распределение	$u_{прибора} / \sqrt{3}$
Разрешающая способность прибора	$u_{p.c.}$	тип В, равномерное асимметричное распределение	$u_{p.c.} / 2\sqrt{3}$
Расширенная неопределённость индивидуальной статической характеристики ТП	$u_{ТП}$	$u_{ТП} = u_{ИСХ}$ в случае индивидуальной градуировки ТП; $u_{ТП} = u_{КД}$ в случае поверки ТП на соответствие классу допуска	
Расширенная неопределенность калибровки ТП	$u_{ИСХ}$	тип В, нормальное распределение	$u_{ИСХ} / 2$
Расширенная неопределенность класса допуска ТП	$u_{КД}$	тип В, равномерное симметричное распределение	$u_{КД} / \sqrt{3}$

Погрешность компенсации температуры опорных спаев	$u_{опор}$	тип В, равномерное симметричное распределение	$u_{опор} / \sqrt{3}$
Удлинительные провода	$u_{провода}$	тип В, равномерное симметричное распределение	$u_{провода} / \sqrt{3}$
Нестабильность ТП за межповерочный интервал (МПИ)	$u_{дрейф}$	тип В, равномерное симметричное распределение	$u_{дрейф} / \sqrt{3}$
Неоднородность ТП	$u_{ТЭН}$	тип В, равномерное симметричное распределение	$u_{ТЭН} / \sqrt{3}$
Нестабильность измеряемой температуры	$u_{НЕСТАБ}$	тип В, равномерное асимметричное распределение	$u_{НЕСТАБ} / 2\sqrt{3}$
Тепловой контакт со средой	$u_{ПЕЧЬ}$	тип В, равномерное симметричное распределение	$u_{ПЕЧЬ} / \sqrt{3}$
Расширенная неопределенность измерения температуры, °С		u_T	

Расширенная неопределенность измерения u_T определяется по формулам:

$$u_T = 2 \sqrt{\frac{u_{прибора}^2 / 3 + u_{ИСХ}^2 / 4 + u_{опор}^2 / 3 + u_{провода}^2 / 3 + u_{дрейф}^2 / 3 + u_{ТЭН}^2 / 3 + u_{НЕСТАБ}^2 / 12 + u_{ПЕЧЬ}^2 / 3 + u_{p.c.}^2 / 12 + u_{СКО}^2}{}} \quad /1/$$

при измерении термопарами с индивидуальной градуировкой

$$\text{или } u_T = 2 \sqrt{\frac{u_{прибора}^2 / 3 + u_{КД}^2 / 3 + u_{опор}^2 / 3 + u_{провода}^2 / 3 + u_{дрейф}^2 / 3 + u_{ТЭН}^2 / 3 + u_{НЕСТАБ}^2 / 12 + u_{ПЕЧЬ}^2 / 3 + u_{p.c.}^2 / 12 + u_{СКО}^2}{}} \quad /2/$$

при измерении термопарами без индивидуальной градуировки.

Рассмотрим подробно каждый источник неопределенности из указанных в таблице 1.

Случайные эффекты при измерении, $u_{СКО}$

Стандартная неопределенность, связанная со случайными эффектами при измерениях, рассчитывается как **СКО среднего значения**:

$$u_{СКО} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (t_i - t_S)^2}{N(N-1)}},$$

где N – количество измерений,

t_i – температура в i -ом измерении,

t_s – среднеарифметическое значение температуры.

Как показывают измерения, проведенные на градуировочной печи МТП-2 и нагревательной печи НАКАЛ при количестве измерений $N = 30$ в диапазоне температур $300 \div 1100$ °С, u_{CKO} не превышает $0,01$ °С.

Неопределенность регистрирующих приборов, $u_{прибора}$

Для измерения температуры термопарами используются в основном милливольтметры различных модификаций, имеющие классы точности от $0,01$ до 1 , или миллиамперметры, когда термопара оснащена нормирующим токовым преобразователем «напряжение–ток». В исследовательских лабораториях для измерения термо-ЭДС используются, как правило, милливольтметры с малой неопределенностью измерений, результаты измерений фиксируются в мВ. В промышленных измерениях для индикации температуры и ее регулирования используют более грубые приборы класса $0,25$ и ниже, при этом измеренное значение напряжения (мВ) или тока (мА) прибор пересчитывает в температуру по номинальной статической характеристике по ГОСТ Р 8.585-2001 [4].

В таблице 2 приведены типовые классы точности и пределы допускаемой погрешности регистрирующих приборов.

Обратите внимание, что эта неопределенность связана только с характеристиками прибора и описывает способность прибора измерить и преобразовать сигнал от термопары.

Таблица 2

Тип прибора	Класс точности или доверительная погрешность	Расширенная неопределенность прибора, при регистрации термопарой типа ХА (расчет для температуры 800 °С)
Милливольтметр МИТ 8.10	$\pm (0,0010 + 10^{-4}U)$ мВ	$\pm 0,11$ °С
Милливольтметр Теркон	$\pm (0,0005 + 5 \cdot 10^{-5}U)$ мВ	$\pm 0,06$ °С
Измеритель-регулятор ТРМ	класс $0,5$	± 4 °С
Измеритель-регулятор PR	класс $0,05$	$\pm 0,4$ °С

В случае если сигнал термопары преобразуется в токовый сигнал нормирующим преобразователем «напряжение–ток» (НП), и затем этот токовый сигнал подается на регистрирующий прибор, необходимо учесть как неопределенность НП, так и регистрирующего прибора. Расширенная неопределенность такой измерительной схемы рассчитывается по формуле $u_{\text{прибора}} = 2\sqrt{u_{\text{НП}}^2/3 + u_{\text{ПР}}^2/3}$, где $u_{\text{НП}}$ – доверительная погрешность НП; $u_{\text{ПР}}$ – доверительная погрешность регистрирующего прибора. В России обычно применяются НП классов точности 0,1; 0,25; 0,5.

В таблице 3 приведена расширенная неопределенность измерительной схемы «НП + регистрирующий прибор» в зависимости от классов точности обоих приборов для температуры 800 °С.

Таблица 3

Класс точности НП	Класс точности регистратора		
	0,1	0,25	0,5
0,1	±1,31 °С	±2,49 °С	±4,71 °С
0,25	±2,49 °С	±3,27 °С	±5,16 °С
0,5	±4,71 °С	±5,16 °С	±6,53 °С

Разрешающая способность измерительного прибора, $u_{p.c.}$

Разрешающая способность стандартного цифрового регулирующего прибора, применяемого для технических измерений и регулировки печей, – 0,1 °С. Разрешающая способность регистрирующего/самопишущего прибора – ~1 °С. В этих случаях вклад разрешающей способности приборов в суммарную неопределённость составляет от 0,03 до 0,3 °С.

Неопределенность компенсации температуры опорных спаев, $u_{\text{опор}}$

При измерении температуры промышленными измерителями/регуляторами температуры неопределенность, связанная с компенсацией температуры опорного спаев, уже включена в класс прибора, а также – в неопределенность нормирующего преобразователя, т.к. указанные приборы имеют встроенный компенсатор температуры опорных спаев. Однако при использовании более точных измерительных приборов, например таких, как милливольтметры «Теркон» или «МИТ», необходимо оценивать величину этой неопределенности отдельно. Данная компонента имеет важное значение,

так как величина термо-ЭДС термопары зависит не от температуры рабочего спаея, а от разницы температур между рабочим и опорным спаеом.

Для определения величины компенсации температуры опорного спаея используют термостатирование опорных спаеов.

Первый способ термостатирования заключается в теплоизоляции опорных спаеов и измерении температуры в зоне опорных спаеов. Температуру опорных спаеов в этом случае измеряют при помощи термометра сопротивления (ТС), либо при помощи ртутного термометра. Значение термо-ЭДС, соответствующее температуре опорных спаеов, суммируют со значением термо-ЭДС термопары, суммарная термо-ЭДС переводится в температуру по таблице НСХ для данного типа термопары. Неопределенность такого варианта компенсации будет равна неопределенности измерения температуры опорных спаеов: для ТС это значение примерно равняется $\pm 0,15 \div 0,35$ °С; для ртутных термометров по ГОСТ 28498-90 [5] – $\pm 0,2$ °С.

Второй способ – термостатирование опорных спаеов термопар при температуре 0 °С. Для этого обычно используют термостаты с льдоводяной смесью, либо жидкостные термостаты. При использовании данного способа термостатирования опорных спаеов нет необходимости корректировать показания термопары.

Этот способ часто используется в метрологических и измерительных лабораториях, но из-за сложности подготовки нулевого термостата и поддержания в должном состоянии льдоводяной смеси практически не применяется в промышленных измерениях. Неопределенность компенсации температуры опорных спаеов в этом случае составляет $\pm 0,01 \div 0,03$ °С (ГОСТ 8.338-2002 [6], ГОСТ 28498-90 [5]).

Неопределенность удлинительной линии, $u_{\text{провода}}$

Требования к метрологическим характеристикам удлиняющих проводов даны в ГОСТ 1791-67 [7], однако данный ГОСТ не в полной мере отвечает современному состоянию термометрии, так как был принят в 1968 году.

Данный ГОСТ содержит технические характеристики проводов только термопар типов ХА, ХК и ПП. В связи с тем, что в настоящее время в практике используется 11 типов термопар, требования к проводам обычно указывают по международному

стандарту МЭК 60584-3 [8]. Далее мы будем ссылаться на требования именно этого стандарта.

Провода изготавливаются двух типов: «удлинительные» и «компенсационные». «Удлинительными» называются провода, изготовленные из термоэлектродного материала того же химического состава, что и термопары. «Компенсационные» провода изготовлены из материалов, которые имеют термо-ЭДС термопары соответствующего типа в ограниченном температурном интервале.

По величине предела допускаемых отклонений провода разделяют на два класса точности.

В таблице 4 приведены технические характеристики проводов согласно МЭК 60584-3. Пределы допускаемых отклонений имеют указанные значения при условии, что термопарой измеряется температура 800 °С, а на концах удлинительной линии температуры не выходят за границы диапазона применения провода.

Характеристики проводов по МЭК 60584-3

Таблица 4

НСХ	Удлинительный провод		Компенсационный провод		Диапазон применения, °С	Пределы допускаемых отклонений	
	Состав термоэлектродов	Код	Состав термоэлектродов	Код		Класс 1	Класс 2
ЖК (J)	Fe/CuNi	Jx	-	-	-25 +200	±85 μV (±1,5 °С)	±140 μV (±2,5 °С)
ХА (K)	NiCr/NiAl	Kx	-	-	-25 +200	±60 μV (±1,5 °С)	±100 μV (±2,5 °С)
	-	-	Fe/CuNi	Kca	0 +150	-	±100 μV (±2,5 °С)
	-	-	Cu/CuNi	Kcb	0 +100	-	±100 μV (±2,5 °С)
ПП (R)	-	-	Cu/CuNi	Rca	0 +100	-	±30 μV (±2,5 °С)
	-	-	Cu/CuNi	Rcb	0 +200	-	±60 μV (±5,0 °С)
ПП (S)	-	-	Cu/CuNi	Sca	0 +100	-	±30 μV (±2,5 °С)
	-	-	Cu/CuNi	Scb	0 +200	-	±60 μV (±5,0 °С)
НН (N)	Nicrosil/Nisil	Nx	-	-	-25 +200	±60 μV (±1,5 °С)	±100 μV (±2,5 °С)
ПР (B)	-	-	Cu/Cu	Bc	0 +100	-	±40 μV (±3,5 °С)

Величина неопределенности, вносимой удлиняющим проводом, равна отклонению термо-ЭДС данного провода от НСХ при заданной разнице температур его концов.

Так как индивидуальной калибровки проводов для промышленного применения не производится, в качестве величины вносимой неопределенности необходимо брать предел допускаемого отклонения для выбранного класса провода.

Для снижения вклада проводов в итоговую неопределенность ГОСТ 8.338 [6] предписывает использовать для точных измерений или поверочных работ специально отобранные удлиняющие провода. В соответствии с п. 5.2 ГОСТ 8.338 величина термо-э.д.с. при температуре рабочего и свободного концов удлинительного (компенсационного) провода, соответственно равной 100 °С и 0 °С, не должна отклоняться от значений НСХ более чем на $\pm 0,2\Delta_{\text{доп}}$, где $\Delta_{\text{доп}}$ – максимально допустимое отклонение от НСХ проводов 1-го класса по МЭК 60584-3. В этом случае отклонение от НСХ не должно превосходить значений, указанных в таблице 5.

Таблица 5

НСХ (тип ТП)	Отклонение от НСХ для термопары типа			
	ХК	ЖК	ХА	НН
$\pm 0,2\Delta_{\text{доп}}$	$\pm 0,5$ °С	$\pm 0,3$ °С	$\pm 0,3$ °С	$\pm 0,3$ °С

Наш опыт применения удлинительных проводов повышенной точности показывает, что необходимо также определять $\Delta_{\text{доп}}$ не только для температуры 100 °С, но и для 70 °С, 50 °С и особенно для 20÷30 °С, так как обычно температура применения проводов как раз находится в этом диапазоне, и не всегда провод, соответствующий вышеуказанному требованию при 100 °С, соответствует ему при 30 °С.

При использовании таких проводов их вклад в итоговую неопределенность в 5 раз меньше, чем при использовании обычных проводов класса 1. Далее будем называть такой провод проводом класса 0.

С самой термопарой при измерении температуры связаны четыре компоненты бюджета неопределенности: $u_{\text{НСХ}}$, $u_{\text{КД}}$, $u_{\text{дрейф}}$, $u_{\text{ТЭН}}$ (табл. 1). Рассмотрим детально каждую из них.

Неопределенность индивидуальной статической характеристики ТП, $u_{ИСХ}$ и $u_{КД}$

Рассмотрим неопределенность $u_{КД}$, связанную с классом термопары, если это термопара общетехническая и не имеет индивидуальной градуировки.

В таблице 6 представлены допустимые отклонения от НСХ термопар различных типов, широко используемых в промышленности, в зависимости от величины измеряемой температуры (ГОСТ 6616-94 [4]).

Таблица 6

тип ТП	Пределы допускаемого отклонения от НСХ для ТП			
	класс 1		класс 2	
Тип К, N	от -40 до 375	$\pm 1,5 \text{ }^\circ\text{C}$	от -40 до 333	$\pm 2,5 \text{ }^\circ\text{C}$
	от 375 до 1300	$\pm 0,004t \text{ }^\circ\text{C}$	от 333 до 1300	$\pm 0,0075t \text{ }^\circ\text{C}$
Тип R, S	от 0 до 1100	$\pm 1,0 \text{ }^\circ\text{C}$	от 0 до 600	$\pm 1,5 \text{ }^\circ\text{C}$
	от 1100 до 1600	$\pm (1,0 + 0,003(t - 1100)) \text{ }^\circ\text{C}$	от 600 до 1600	$\pm 0,0025t \text{ }^\circ\text{C}$

Производители термопар гарантируют, что индивидуальные статические характеристики термопары в состоянии поставки находятся в пределах отклонений от НСХ, указанных в таблице 6, что подтверждается Свидетельством о первичной поверке.

В качестве значения $u_{КД}$ для технических термопар берётся предельно допустимое отклонение от НСХ для термопар соответствующего типа в зависимости от класса допуска.

Значительной ошибкой многих пользователей термопар является использование только данной компоненты неопределенности, связанной с ТП, при расчете итоговой неопределенности измерения температуры.

В случае использования термопары с индивидуальной градуировкой в качестве неопределённости индивидуальной статической характеристики термопары необходимо применять значение расширенной неопределенности индивидуальной градуировки $u_{ИСХ}$.

При индивидуальной градуировке определяется поправка к показаниям термопары, позволяющая существенно повысить точность измерений температуры. Данную поправку применяют весь период времени до следующей градуировки.

В современных калибровочных лабораториях обеспечивается неопределенность градуировки термопар типов К и N, равная $\pm 0,45 \div 1,80 \text{ }^\circ\text{C}$ при температурах $0 \div 1100 \text{ }^\circ\text{C}$,

в зависимости от применяемых средств калибровки и значения верхнего предела температуры градуировки.

Нестабильность за межповерочный интервал (МПИ), и дрейф

ГОСТ 6616 [10] регламентирует, что изменение ИСХ термомпар за 2 часа выдержки при максимальной температуре применения не должно превышать половины величины класса допуска. Другие численные требования к дрейфу технических термомпар ни одним действующим нормативным документом не регламентируются.

Однако термомпары, как и любые другие средства измерения, характеризуются изменением метрологических характеристик в процессе эксплуатации.

Общие методы определения МПИ СИ изложены в межгосударственных рекомендациях по стандартизации РМГ 74-2004 [9]. Рекомендации описывают методы определения межповерочных и межкалибровочных интервалов, основанные на предположении о непрерывном (с конечной случайной скоростью) изменении метрологических характеристик СИ в процессе их эксплуатации или хранения, определяют критерии установления МПИ и алгоритм его вычисления.

Согласно РМГ 74, наиболее предпочтительными являются испытания партии СИ для оценки их нестабильности (метрологической надежности). Эти испытания могут быть проведены специально (в нормальном или форсированном режиме эксплуатации), совмещены с контрольными испытаниями на надежность либо проведены путем подконтрольной эксплуатации установочной партии.

Для проведения испытаний формируют партию СИ, объем партии должен быть не менее 30 изделий (РМГ 74, п. А.2.1). Отобранную партию СИ подвергают испытаниям в обычном или ускоренном (с известным коэффициентом ускорения) режиме. Через равные промежутки времени эксплуатации или наработки Δt проводят измерения контролируемых параметров.

Суть расчетного метода заключается в получении аппроксимирующего полинома по экспериментальным данным изменения ИСХ группы термомпар во времени (рис. 1.). При этом рассчитывается СКО для исследуемой группы и определяется характер изменения СКО со временем. МПИ определяется по графику как абсцисса места пересечения аппроксимирующего полинома, построенного с учетом СКО, и границы

допуска для исследуемой группы с учетом неопределенности выполнения измерений при доверительной вероятности 95%.

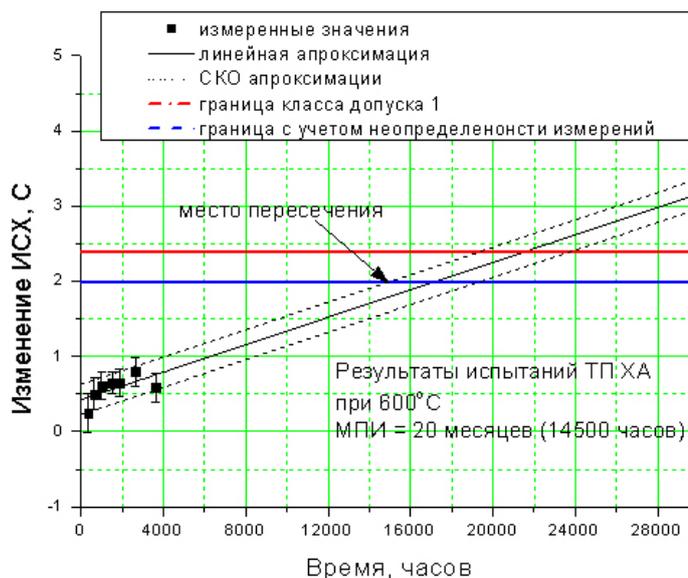


Рис. 1.

Таким образом, при назначении МПИ по действующему нормативному документу РМГ-74 не подразумевается нахождение ИСХ термопары в границах класса допуска весь период МПИ. Гарантируется лишь то, что изменение ИСХ термопары не превысит величины класса допуска с учетом СКО и неопределенности выполнения измерений.

Так как законы изменения ИСХ термопар в зависимости от условий и времени эксплуатации на сегодняшний день не определены то, основываясь на методике определения МПИ по РМГ-74, за величину $u_{\text{дрейф}}$ считаем допустимым брать значение предела допустимого отклонения термопары конкретного класса: 3,2 °С – для ТП типов К и N 1-го класса и 6 °С – для ТП 2-го класса (для температуры 800 °С). Предел допустимого отклонения для всех типов термопар рассчитывается по ГОСТ Р 8.585. Это приближение незначительно грубее предельного значения допустимого дрейфа по РМГ-74, но в расчетах данное приближение удобнее использовать. Например, для термопары типа ХА 1-го класса допуска, используемой при 800 °С, изменение ИСХ за МПИ может составить до 3,2 °С. Если начальная градуировка термопары была в отрицательной области, ИСХ термопары останется в пределах класса допуска 1; если

же ИСХ была, например, $+3\text{ }^{\circ}\text{C}$, и дрейф составил $+3,2\text{ }^{\circ}\text{C}$, то после истечения МПИ ИСХ термопары окажется за границами даже 2-го класса допуска.

Термоэлектрическая неоднородность ТП, $u_{ТЭН}$

Значительный вклад в неопределенность измерения температуры вносит термоэлектрическая неоднородность (ТЭН), приводящая к изменению метрологических характеристик термопары по ее длине.

В термопарах из благородных металлов (особенно для типа К) ТЭН возникает уже после первых десятков часов использования [11].

Проявление ТЭН заключается в зависимости показаний термопары не только от разницы температур опорного и рабочего спая, но и от распределения температуры по длине термопары. Показания термопары с наличием ТЭН при различной глубине погружения в термометрируемую среду могут различаться, притом что температура горячего спая будет оставаться неизменной. Это отличие может составлять от 0,1 до $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ [12, 13].

На рис. 2 показано проявление ТЭН у кабельной термопары типа К (ХА) диаметром 3 мм до отжига (ТЭН отсутствует) и после 20-ти часового отжига. Отжиг проводился при глубине погружения 100 мм на температуре $600\text{ }^{\circ}\text{C}$, затем термопара погружалась в среду с равномерным распределением температуры. При изменении глубины погружения от 50 до 300 мм показания термопары изменились на $1,5\text{ }^{\circ}\text{C}$.

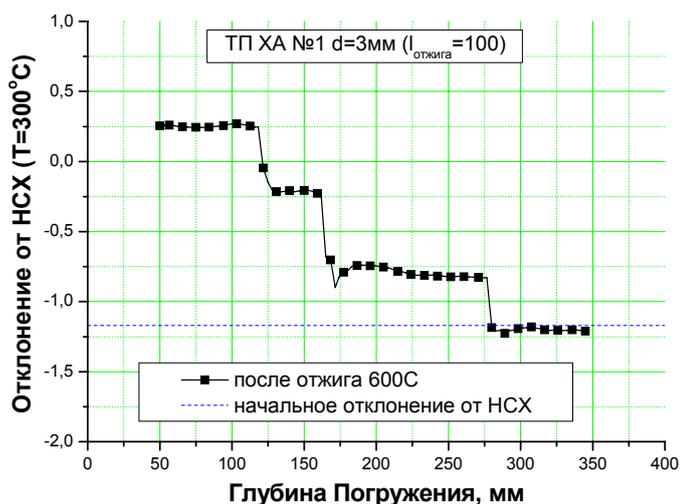


Рис. 2.

По результатам многочисленных исследований, проведенных различными авторами [13, 14], среди термопар из благородных металлов наименее подвержены возникновению ТЭН термопары типа N. Наши исследования показали, что проявление ТЭН у термопар типа N в 2–5 раз слабее, чем у термопар типа K.

В настоящее время в системе стандартизации РФ не предусмотрено требований к величине допустимой ТЭН для технических термопар из благородных металлов (K, N и др.). Отсутствие данного требования связано с двумя основными причинами: сложность реализации метода достоверного определения проявления ТЭН и непонимание важности знаний о ТЭН и величине возможной ошибки в температурных измерениях, вызываемой наличием ТЭН.

Только в ГОСТ Р 52314 [15], описывающем требования к эталонным термопарам, указаны величины допустимой ТЭН для платиновых эталонных термопар и способ определения данной ТЭН. К сожалению, указанный способ далек от идеала, но он легко реализуем и достаточно корректен для эталонных термопар, применяемых в однотипных трубчатых градуировочных печах. В таблице 7 приведены допустимые значения ТЭН из указанного ГОСТа.

Допустимая неоднородность эталонных термопреобразователей
при периодической поверке

Таблица 7

Тип ТП	Разряд ТП	Температура, °С	Неоднородность, °С
ППО	1	1100	0,27
	2		0,54
	3		0,73
ПРО	1	1450	0,57
	2		1,07
	3		1,43

Данные предельные значения ТЭН для эталонных термопар определяются как разница показаний термопары при глубинах погружения в печь 250 и 300 мм. При этом предполагается, что именно в этой зоне печи находится «полка» с наименьшим градиентом температур. Данный тест адекватен, если термопара затем будет использоваться именно при этих глубинах погружения и в аналогичных температурных полях. Если же термопара, которую считают однородной после проверки в печи, затем применяется в принципиально другом температурном поле, например, при погружении

в мини-ампулу точки затвердевания на глубину всего 150 мм, то это может привести к ошибке в измерении температуры ампулы.

Все выше приведенные данные свидетельствуют о крайней важности учета ТЭН при измерении температуры термопарами. Именно из-за ТЭН многие иностранные стандарты запрещают повторную калибровку либо поверку термопар из благородных металлов после их эксплуатации. В частности, такие требования есть в ASTM E220 [16] и SAE AMS 2750D [17]. В стандарте AMS 2750D указано также, что недопустимо повторно использовать термопару при меньших глубинах погружения, чем она эксплуатировалась ранее. Разрешается использование только на той же или большей глубине.

При любом изменении условий применения термопары, вызывающем изменение распределения температуры по её длине, например глубины погружения, на показания термопары неизбежно будет влиять ее неоднородность. В настоящее время невозможно предсказать величину данного влияния. В связи с этим $u_{ТЭН}$ численно в расчетах далее не учитывается, но всегда надо помнить, что неоднородность может вызвать увеличение суммарной неопределенности измерений температуры от 10% до 100% и более.

Нестабильность измеряемой температуры, $u_{НЕСТАБ}$

Стандартная неопределенность, связанная с **нестабильностью** температуры в **печи** за время всех измерений:

$$u_{НЕСТАБ} = \frac{t_{\max} - t_{\min}}{2\sqrt{3}},$$

где t_{\max} и t_{\min} – соответственно максимальная и минимальная температура, измеренная эталонным датчиком за время проведения всех измерительных циклов.

По результатам испытаний градуировочной печи МТП-2 и нагревательной печи НАКАЛ определено, что скорость изменения температуры в рабочей зоне печи не превышает 0,1 °С/мин. Изменение температуры за время проведения измерений (~1 мин) не превышает 0,1 °С. В технологических печах стабильность поддержания температуры существенно хуже и не может быть оценена значением менее 1 °С.

Тепловой контакт со средой, $u_{ПЕЧЬ}$

Согласно требованиям установки термопар на объекте необходимо, чтобы термопара была погружена в термометрируемую среду на величину больше или равную минимальной глубине погружения для данной конструкции преобразователя. В случае отсутствия данных по величине минимальной глубины погружения необходимо, чтобы рабочая часть термопары находилась в изотермической зоне термометрируемого объекта и была длиной не менее 15 диаметров термопары.

При этих условиях отклонение показаний термопары от температуры объекта и, соответственно, расширенная неопределенность за счет характеристик теплового контакта термопары со средой $u_{ПЕЧЬ} = 0$.

2. Примеры расчета расширенной неопределенности измерения температуры термопарами

Все примеры, которые будут приведены ниже, рассчитывались для следующих условий:

- измеряемая температура 800 °С;
- максимальная температура на удлинительном проводе не превосходит допустимого значения для данного класса и типа провода;
- измерительный прибор и/или нормирующий преобразователь находятся в нормальных условиях эксплуатации (температура и влажность соответствуют нормируемым значениям);
- $u_{СКО}$ не превышает 0,01 °С;
- разрешающая способность стандартного цифрового регулирующего прибора, применяемого для технических измерений и регулировки печей – 0,1 °С. Разрешающая способность регистрирующего/самопишущего прибора – 1 °С;
- изменение температуры за время проведения измерений не превышает 1 °С;
- обеспечен тепловой контакт термопары с термометрируемой средой, $u_{ПЕЧЬ} = 0$.

Технические измерения

В промышленных условия измерения температуры используются три варианта измерительных схем. Ниже приведены результаты расчетов неопределенности для

каждой из них. ТЭН необходимо учитывать, если в процессе работы термопара используется в различных температурных полях. Если условия использования термопары неизменны, влиянием ТЭН можно пренебречь.

Схема 1.



В данной схеме используются термопары с первым и вторым классом допуска. Приборы обычно используются классов 0,25 и 0,5. Длина удлинительной линии может достигать нескольких сотен метров.

В таблице 8 приведены результаты расчета расширенной неопределенности результатов измерений для различных комбинаций компонент схемы.

Расчет производился по формуле /2/

$$u_T = 2 \sqrt{\frac{u_{\text{прибора}}^2 / 3 + u_{\text{КД}}^2 / 3 + u_{\text{опор}}^2 / 3 + u_{\text{провода}}^2 / 3 + u_{\text{дрейф}}^2 / 3 + u_{\text{ТЭН}}^2 / 3}{+ u_{\text{НЕСТАБ}}^2 / 12 + u_{\text{ПЕЧЬ}}^2 / 3 + u_{\text{р.с.}}^2 / 12 + u_{\text{СКО}}^2}}$$

при $u_{\text{СКО}} = \pm 0,01 \text{ } ^\circ\text{C}$;

$u_{\text{прибора}} = \pm 2 \text{ } ^\circ\text{C}$ для приборов класса 0,25 и $\pm 4 \text{ } ^\circ\text{C}$ для приборов класса 0,5;

$u_{\text{КД}} = \pm 3,2 \text{ } ^\circ\text{C}$ для ТП класса 1 и $\pm 6 \text{ } ^\circ\text{C}$ для ТП класса 2;

$u_{\text{опор}} = 0 \text{ } ^\circ\text{C}$;

$u_{\text{провода}} = \pm 1,5 \text{ } ^\circ\text{C}$ для провода класса 1 и $\pm 2,5 \text{ } ^\circ\text{C}$ для провода класса 2;

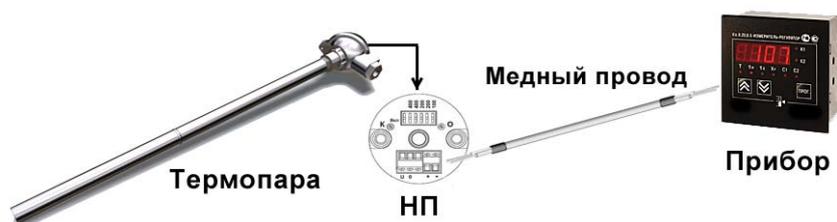
$u_{\text{дрейф}} = \pm 3,2 \text{ } ^\circ\text{C}$ для ТП класса 1 и $\pm 6 \text{ } ^\circ\text{C}$ для ТП класса 2;

$u_{\text{ТЭН}} = 0 \text{ } ^\circ\text{C}$; $u_{\text{НЕСТАБ}} = 1 \text{ } ^\circ\text{C}$; $u_{\text{ПЕЧЬ}} = 0 \text{ } ^\circ\text{C}$; $u_{\text{р.с.}} = 1 \text{ } ^\circ\text{C}$.

Таблица 8

Класс ТП	Класс провода	Класс прибора	Расширенная неопределенность результатов измерений, $^\circ\text{C}$ (расчет для температуры $800 \text{ } ^\circ\text{C}$)
1	1	0,25	$\pm 6,1$
1	1	0,5	$\pm 7,3$
1	2	0,25	$\pm 6,5$
1	2	0,5	$\pm 7,6$
2	2	0,25	$\pm 10,6$
2	2	0,5	$\pm 11,3$

Схема 2.



В данной схеме отсутствует удлинительный провод, сигнал в виде постоянного тока передаётся по обычным медным проводам, соответственно в бюджете неопределенности нет компоненты, связанной с характеристиками провода. При этом надо помнить, что стандартная неопределенность, связанная с приборной частью, состоит из двух компонент и равняется $u_{прибора} = \sqrt{u_{НП}^2/3 + u_{ПР}^2/3}$. Все остальные рассуждения по вычислению бюджета неопределенности сохраняются как в первом случае. Результаты представлены в таблице 9.

Следует отметить, что многие НП, устанавливаемые непосредственно на термопары, имеют возможность подстройки под ИСХ термопары. Для такой подстройки проводится корректировка показаний НП в метрологической лаборатории. Для НП изменяются настройки начального тока «0» и наклон передаточной характеристики «k». Процедура совместной калибровки НП и ТП подробно описана в МИ 2356-2001 [20]. Преимуществом совместной настройки является то, что в бюджете неопределенности измерений такой термопарой $u_{ТП}$ следует брать равной 0. В таблице 9 приведены результаты расчета расширенной неопределенности для обоих вариантов первичной поверки НП и ТП.

Расчет произведен для тех же параметров, что и для схемы 1.

Таблица 9

Класс ТП	Класс НП	Класс прибора	Расширенная неопределенность результатов измерений, °C (расчет для температуры 800 °C)	
			Совместная поверка ТП и НП	Отдельная поверка ТП и НП
1	0,25	0,25	±5,0	±6,2
1	0,25	0,5	±6,4	±7,4
1	0,5	0,25	±6,4	±7,4
1	0,5	0,5	±7,5	±8,4
2	0,25	0,25	±7,7	±10,4
2	0,25	0,5	±8,7	±11,1
2	0,5	0,25	±8,7	±11,1
2	0,5	0,5	±9,6	±11,8

Схема 3.



Из всех используемых измерительных схем для промышленных измерений температуры третья схема имеет наибольшее количество составляющих и, как следствие, наибольшие неопределенности измерений для ее вариантов. Как и в предыдущей схеме $u_{\text{прибора}}$ является составной величиной.

Результаты расчетов представлены в таблице 10.

Таблица 10

Класс ТП	Класс провода	Класс НП	Класс прибора	Расширенная неопределенность измерений, °С (расчет для температуры 800 °С)
1	1	0,25	0,25	±6,5
1	1	0,25	0,5	±7,6
1	1	0,5	0,25	±7,6
1	1	0,5	0,5	±8,6
1	2	0,25	0,25	±6,9
1	2	0,25	0,5	±7,9
1	2	0,5	0,25	±7,9
1	2	0,5	0,5	±8,9
2	2	0,25	0,25	±10,8
2	2	0,25	0,5	±11,5
2	2	0,5	0,25	±11,5
2	2	0,5	0,5	±12,2

Точные технические измерения

Делая первый шаг к повышению точности измерений, обычно выбирают использование более точного регистрирующего прибора, например класса 0,1, а также проведение индивидуальной калибровки термопары. Схему измерений при этом не изменяют. Рассмотрим данный подход более подробно на примере 1-ой схемы. Схема измерений состоит из термопары с индивидуальной градуировкой, удлинительного провода класса 1 и регистрирующего прибора с классом точности 0,1.

Термопара, имеющая индивидуальную градуировку, позволяет ввести поправку к измеренной с её помощью температуре. Таким образом, известна поправка к

термопарам в начальный момент использования. Данную поправку можно и следует использовать весь период времени до следующей поверки, при этом обязательно надо учитывать возможный дрейф термопары за МПИ.

В качестве значения неопределенности ИСХ термопары $u_{ИСХ}$ в данном случае необходимо брать значение расширенной неопределенности индивидуальной градуировки.

В лаборатории ПК «Тесей», оснащенной современными средствами измерений, обеспечивается неопределенность градуировки термопар типов К, N равная $\pm 0,45 \div 1,80$ °C при температурах $0 \div 1100$ °C в зависимости от применяемых средств поверки и значения верхнего предела температуры градуировки.

Как уже было сказано, всегда необходимо учитывать дрейф ИСХ термопар. Величина этого дрейфа не зависит от того обычная это термопара или термопара с индивидуальной градуировкой. За величину дрейфа, как и для обычных термопар, взято значение максимально допустимого отклонения ИСХ от НСХ для термопары конкретного класса и при измеряемой температуре.

Результаты расчетов для 800 °C приведены в таблице 11.

Расчет производился по формуле /1/

$$u_T = 2 \sqrt{\frac{u_{\text{прибора}}^2 / 3 + u_{\text{ИСХ}}^2 / 4 + u_{\text{опор}}^2 / 3 + u_{\text{провода}}^2 / 3 + u_{\text{дрейф}}^2 / 3 + u_{\text{ТЭН}}^2 / 3 + u_{\text{НЕСТАБ}}^2 / 12 + u_{\text{ПЕЧЬ}}^2 / 3 + u_{\text{р.с.}}^2 / 12 + u_{\text{СКО}}^2}{}}$$

при $u_{\text{СКО}} = \pm 0,01$ °C;

$u_{\text{прибора}} = \pm 0,8$ °C для приборов класса 0,1 и $\pm 2,0$ °C для приборов класса 0,25;

$u_{\text{ИСХ}} = \pm 0,8$ °C для ТП с индивидуальной градуировкой;

$u_{\text{опор}} = 0$ °C;

$u_{\text{провода}} = \pm 0,3$ °C для проводов класса 0 и $\pm 1,5$ °C для проводов класса 1;

$u_{\text{дрейф}} = \pm 3,2$ °C для ТП класса 1;

$u_{\text{ТЭН}} = 0$ °C; $u_{\text{НЕСТАБ}} = 1$ °C; $u_{\text{ПЕЧЬ}} = 0$ °C; $u_{\text{р.с.}} = 0,1$ °C.

Также в таблице 11 приведены результаты расчета неопределенности при использовании в схеме измерений высокоточного провода класса 0. Использование такого провода улучшает точность измерений примерно на 20 % для постоянных измерений температуры термопарами из благородных металлов.

Расширенная неопределенность измерений по схеме 1 повышенной точности

Таблица 11

Тип ТП	Класс провода	Класс прибора	Расширенная неопределенность измерений, °С (расчет для температуры 800 °С)
ХА, НН индивидуальная град.	0	0,1	±4,0
ХА, НН индивидуальная град.	1	0,1	±4,3
ХА, НН индивидуальная град.	0	0,25	±4,5
ХА, НН индивидуальная град.	1	0,25	±4,8
ПП (R), ПП (S) 1 класс	0	0,1	±1,9
ПП (R), ПП (S) 1 класс	1	0,1	±2,6
ПП (R), ПП (S) 1 класс	0	0,25	±2,9
ПП (R), ПП (S) 1 класс	1	0,25	±3,3
ПП (R), ПП (S) 2 класс	0	0,1	±2,6
ПП (R), ПП (S) 2 класс	1	0,1	±3,1
ПП (R), ПП (S) 2 класс	0	0,25	±3,3
ПП (R), ПП (S) 2 класс	1	0,25	±3,7

Для сравнения в таблице приведены результаты расчета неопределенности измерений температуры платиновыми термопарами типов R и S различных классов допуска без индивидуальной градуировки.

К сожалению, многие пользователи термопар забывают учесть влияние прибора и провода и используют только неопределенность градуировки термопары. Также лишь немногие осознают важность учета дрейфа и влияния ТЭН. Заметим еще раз, что все вышеприведенные расчеты проведены в предположении о неизменности условий эксплуатации термопар, и в эти расчеты не включено влияние ТЭН. Основной причиной этого является крайне сложная природа возникновения и развития ТЭН в термопарах и невозможность ее количественного учета в неизвестных условиях применения.

Дрейф термопар вносит существенный вклад в общую неопределенность измерений. Помимо этого, если изменить условия эксплуатации термопары, например

глубину погружения, дополнительный вклад внесёт ТЭН. Величина этого вклада может быть весьма существенной и достигать 5–10 °С, и таким образом ТЭН является основной причиной снижения точности измерений.

Для увеличения точности измерений за счет устранения влияния ТЭН, компанией «Тесей» были разработаны термопары специальной конструкции (серия 21.хх).

Термопары данной серии предназначены для проведения их бездемонтажной поверки и/или градуировки. В качестве эталонного средства измерения предполагается использование эталонной термопары КЭТНН.

Кабельная эталонная термопара 3 разряда с нихросил-нисловыми термоэлектродами КЭТНН [18] была разработана специально для проведения бездемонтажной поверки при различных температурных полях, на различных глубинах погружения в диапазоне температур от 200 до 1100 °С без увеличения неопределенности измерений в процессе эксплуатации.

Производитель гарантирует расширенную неопределенность термопар КЭТНН от $\pm 0,85$ °С до $\pm 1,5$ °С в диапазоне температур 200...1100 °С на протяжении всего времени их использования с учетом их дрейфа и возможного возникновения в них ТЭН. Эти термопары не подлежат периодической поверке. Ресурс термопар составляет 500 замеров (500 термоциклов 25 °С...1100 °С).

Способ бездемонтажной поверки и/или градуировки подробно описан в разработанной компанией «Тесей» методике поверки МИ 3091-2007 [19].

При бездемонтажной поверке ТЭН не влияет на результаты измерений, так как контролируемая термопара поверяется в том же температурном поле, в котором и используется. Результаты такой поверки гораздо более достоверны, чем результаты поверки в лабораторных условиях.

Неопределенность проведения поверки по МИ 3091-2007 составляет от $\pm 0,9$ °С до $\pm 1,8$ °С в диапазоне температур от 200 °С до 1100 °С при использовании рекомендованного переносного измерительного прибора НН506РА.

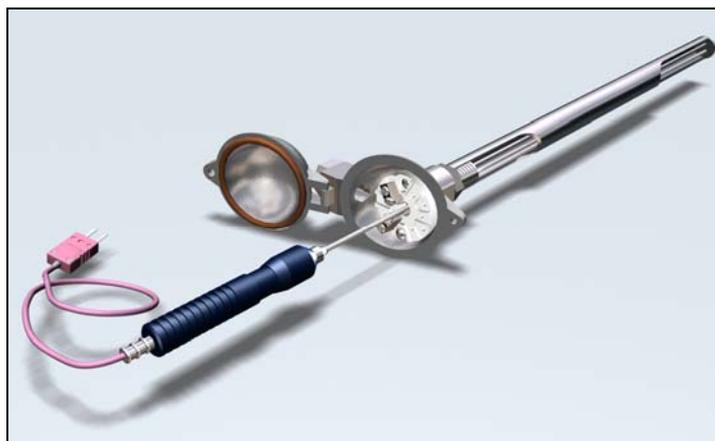


Рис. 3. Термопара КТхх 21.хх и КЭТНН

Если регулярно проводить калибровку рабочих термопар конструкции 21.хх, то можно существенно повысить точность измерений за счет того, что дрейф термопары можно брать равным $\pm 0,5 \div 1,0$ °С, а не величине класса допуска, как было указано выше. Необходимая регулярность проведения калибровок зависит от конкретных условий эксплуатации. Периодичность проведения калибровок $T_{град}$ можно определить, исходя из следующего критерия: дрейф ИСХ термопары за любой интервал времени $T_{град}$ в течение применения термопары не превосходит значения $u_{дрейф}$, заложенного в бюджет неопределенности измерений температуры на объекте (например $\pm 0,5 \div 1,0$ °С).

В таблице 12 приведены результаты расчета расширенной неопределенности измерений для тех же самых условий, что и в таблице 11 для прибора класса 0,1, только с условием, что регулярно проводится бездемонтажная калибровка:

при $u_{СКО} = \pm 0,01$ °С; $u_{прибора} = \pm 0,8$ °С; $u_{ИСХ} = \pm 0,8$ °С; $u_{опор} = 0$ °С;
 $u_{провода} = \pm 0,3$ °С для проводов класса 0 и $\pm 1,5$ °С для проводов класса 1;
 $u_{дрейф} = \pm 0,5$ °С и $\pm 1,0$ °С; $u_{ТЭН} = 0$ °С; $u_{НЕСТАБ} = 1$ °С; $u_{ПЕЧЬ} = 0$ °С; $u_{p.c.} = 0,1$ °С.

Таблица 12

Тип ТП (индивидуальная градуировка)	Класс провода	Допустимый дрейф между градуировками, °С	Расширенная неопределенность измерений, °С (расчет для температуры 800 °С)
ХА, НН	0	$\pm 0,5$	$\pm 1,9$
ХА, НН	1	$\pm 0,5$	$\pm 2,5$
ХА, НН	0	$\pm 1,0$	$\pm 2,1$
ХА, НН	1	$\pm 1,0$	$\pm 2,7$

Из таблицы 12 видно, что периодическая бездемонтажная калибровка термопар на месте использования существенно повышает точность измерения температуры. Следует еще раз подчеркнуть, что данного результата невозможно достичь путем регулярной поверки в лабораторных условиях из-за проявления ТЭН в поверяемых термопарах. Для термопар из неблагородных металлов типов НН и ХА, при условии их регулярной бездемонтажной калибровки, вполне достижимы значения неопределенности измерений температуры, соответствующие платиновым термопарам типа ПП.

Заключение.

1. Расширенная неопределенность измерений температуры термопарами из неблагородных металлов составляет от $\pm 6,1$ °С до ± 12 °С.
2. При использовании термопар с индивидуальной градуировкой либо термопар, откалиброванных и настроенных в комплекте с нормирующим преобразователем, совместно с высокоточными приборами (кл. 0,1; 0,25), расширенную неопределенность измерений можно снизить до $\pm 4,0 \div 5,0$ °С.
3. Использование термопар конструкции 21.xx и их регулярная градуировка с помощью термопар КЭТНН позволяют существенно повысить точность измерений. Расширенная неопределенность измерений составляет $\pm 1,9 \div 2,7$ °С, что соответствует расширенной неопределенности измерений платиновыми термопарами ПП(S) 1-го класса точности.

ЛИТЕРАТУРА.

1. Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement: First edition. - ISO, Switzerland, 1993. - 101 pp. (Руководство по выражению неопределенности измерения: Перевод с англ. под науч. ред. проф. Слаева В.А. - ВНИИМ им. Д.И. Менделеева, С.-Петербург, 1999. - 134 с.).
2. РМГ 43-2001 ГСИ. Применение «Руководства по выражению неопределенности измерений».
3. EA-4/02 Expression of the Uncertainty of Measurement in Calibration (Выражение неопределенности измерения при калибровке) // European co-operation for Accreditation (EA), 1999

4. ГОСТ Р 8.585-2001 Термопары. Номинальные статические характеристики преобразования.
5. ГОСТ 28498-90. Термометры жидкостные стеклянные. Общие технические требования. Методы испытаний
6. ГОСТ 8.338-2002. Преобразователи термоэлектрические. Методика поверки.
7. ГОСТ 1791-67. Проволока из никелевого и медно-никелевых сплавов для удлиняющих проводов к термоэлектрическим преобразователям. Технические условия.
8. МЭК 60584-3 IEC:200X Термопары-часть 3. Удлинительные и компенсационные провода – допустимые отклонения и система обозначений.
9. РМГ 74-2004 Методы определения межповерочных и межкалибровочных интервалов средств измерений.
10. ГОСТ 6616. Преобразователи термоэлектрические. Общие технические условия.
11. Каржавин В.А. Влияние термопар на неопределенность теплофизического эксперимента. Сборник трудов XVI Школы-семинара молодых ученых и специалистов «Проблемы газодинамики и теплообмена в энергетических установках», под руководством академика РАН А.И. Леонтьева, СПбГПУ.
12. Rosch, W. et al. Damage of Fine-Diameter Platinum-Sheathed Type R Thermocouples at Temperatures Between 950 and 1100 °C. // *TMCSI*, 6, Part 1, AIP, NY, 1992.
13. R. E. Bentley. Irreversible thermoelectric changes in type K and type N thermocouple alloys within Nicrosil-sheathed MIMS cable. // *J. Phys. D.*,22:1908-15, 1989.
14. Burley, N. A., Advanced integrally sheathed type N thermocouple of ultra-high thermoelectric stability, *Measurement*.-1990 Jan-Mar, pp 36-41.
15. ГОСТ Р 52314-2005. Преобразователи термоэлектрические платинородий-платиновые и платинородий-платинородиевые эталонные 1, 2 и 3-го разрядов. Общие технические требования.
16. ASTM E220-07a Standard Test Method for Calibration of Thermocouples By Comparison Techniques (Стандартный метод испытания для калибровки термопар методами сравнения).
17. SAE AMS 2750D Pyrometry.
18. Патент №39200 от 15 апреля 2004 г. на полезную модель «Эталонный термоэлектрический преобразователь».
19. МИ 3091-2007 ГСИ. Преобразователи термоэлектрические с дополнительным каналом для эталонного кабельного термоэлектрического преобразователя. Методика поверки.
20. МИ 2356-2001 ГСИ. Термопреобразователи с унифицированным выходным сигналом ТСМУ-055, ТСМУ-205, ТСПУ-055, ТСПУ-205, ТХАУ-205, ТХКУ-205. Методика поверки.