

КОНТРОЛЬ ДОСТОВЕРНОСТИ ПОКАЗАНИЙ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ БЕЗ ЕГО ДЕМОНТАЖА С ОБЪЕКТА.

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

В современной промышленности все более строгие требования предъявляются к точности измерения параметров технологических процессов вообще и температуры в частности. Так как значительная часть всех температурных измерений в промышленности и научных исследованиях приходится на долю термоэлектрических преобразователей, чувствительными элементами которых являются термопары, вопрос достоверности их показаний приобретает все большую актуальность.

На сегодня нет утвержденных в установленном порядке методик поверки или калибровки термоэлектрических преобразователей (ТП) без их демонтажа с термометрируемого объекта. Единственным методом периодической поверки остается метод, изложенный в ГОСТ 8.338-2002 [1]. Реализация методики производится при расположении рабочих спаев ТП и эталонного термоэлектрического преобразователя в равномерном температурном поле с нормированной протяженностью и величиной градиента, причем эталонный и поверяемый ТП помещаются в печь на одинаковую фиксированную глубину, составляющую, как правило, 250 мм. При этом глубина погружения в печь никак не связана с глубиной погружения ТП в условиях его бывшей или предстоящей эксплуатации. Профиль температурного поля вдоль эталонного и поверяемого ТП зависит от характеристик конкретной печи, и будет отличаться от профиля в условиях эксплуатации. В основе методики лежит предположение о том, что величина термоэлектродвижущей силы (ТЭДС) зависит только от разницы температур между горячим и холодным спаями, и, не зависит от изменений температуры по длине термоэлектродов и это верно, но только в том случае, если термоэлектроды поверяемого и эталонного ТП однородны.

В процессе эксплуатации ТП в термоэлектродах неизбежно возникает термоэлектрическая неоднородность (ТЭН), определяемая как отклонение дифференциальной чувствительности (коэффициента Зеебека) на данном участке термоэлектрода от некоторого нормированного значения [2]. Скорость развития ТЭН и её величина зависят от ряда причин связанных с воздействием внешней среды, особенно при высокой температуре, и вызывающих изменения состава и структуры материала. Среди основных:

- изменение химического состава термоэлектродов при взаимодействии с изолирующими материалами и окружающей средой за счет избирательного окисления, испарения или связывания в соединения элементов;
- рекристаллизация, рост зерна;
- превращения в твердом состоянии (упорядочение, распад твердого раствора);
- пластическая деформация и упругие напряжения;
- воздействие радиации и электромагнитных полей.

Проведение периодической поверки ТП ранее эксплуатировавшихся, а значит приобретших ТЭН, по методике непосредственного сличения, изложенной в ГОСТ 8.338-2002, может привести к ложным выводам. Причиной этого послужит то, что величина ТЭДС, развиваемая такими ТП, будет зависеть от глубины погружения и профиля температурного поля, в котором проводилось сличение, причем отличного от профиля в условиях эксплуатации, а не только от разницы температур между горячим и холодным спаями. Тем более, указанную методику нельзя применять при калибровке ТП, заключающейся в определении поправок к показаниям уже эксплуатировавшихся ТП или при их градуировке, то есть определении индивидуальной зависимости развиваемой ТЭДС от температуры, поскольку эти результаты будут действительны только для того профиля температурного поля, в котором они были получены.

Сегодня самый надежный способ повышения достоверности измерений это непосредственное сличение показаний рабочей термопары с контрольным средством измерения температуры, при условии, что сличение проводится в рабочих условиях. Так, в стандарте AMS (требования к аэрокосмическим материалам) 2750 «Пирометрия» международного общества SAE есть требование, предписывающее производить сличение показаний рабочей термопары с контрольной, без её демонтажа из печи. Реализуется данное требование путем установки контрольного датчика вблизи рабочего таким образом, чтобы обеспечивать регламентированное стандартом расстояние между их торцами (от 76 мм до 305 мм в зависимости от класса оборудования). При этом допустимой считается разница в показаниях в $\pm 3^{\circ}\text{C}$ для расстояний менее 76 мм и в $\pm 6^{\circ}\text{C}$ для расстояний менее 305 мм. Известны также рекомендации данные руководством по использованию термопар MNL-12 американского общества по испытанию материалов [3]. В руководстве говорится, что ТП должен калиброваться при тех же условиях и на том же объекте, в которых он используется, то есть в реальном температурном поле, что позволяет избежать проявления дополнительной неопределенности обусловленной проявлением ТЭН. Калибровка осуществляется методом сравнения показаний рабочего ТП с эталонным. В этом случае важно, как и при поверке или градуировке термопар в лабораторных условиях, обеспечить равенство температуры рабочего спая эталонного и поверяемого ТП. Для чего, контрольный ТП устанавливается на термометрируемом объекте по одному из трёх вариантов. Первый вариант: он может быть установлен в дополнительном отверстии, просверленном в объекте рядом с местом установки калибруемого ТП. Второй вариант: часто в случае, когда ТП помещен в дополнительную защиту – термометрический карман в виде чехла из чугуна, шамотной глины, карбида кремния или другого огнеупора, который расположен стационарно на термометрируемом объекте, - контрольный ТП можно также разместить в нем. Третий вариант гораздо менее удовлетворителен. Он заключается в том, что запись показаний калибруемого ТП производится в момент, когда термометрируемый объект достигнет относительно постоянной температуры, затем ТП вынимается и на его место, на ту же глубину устанавливается контрольный. Так как, в большинстве печей, используемых в промышленных процессах, происходят достаточно большие колебания температуры, то при использовании данного способа калибровки ТП нет уверенности, что эталонный ТП будет находиться при той же температуре что и калибруемый.

К недостаткам описанного способа можно отнести то, что его реализация не всегда возможна по условиям безопасной эксплуатации и требует дополнительных затрат на организацию дополнительного отверстия или увеличение диаметра термометрического кармана. А также то, что величина погрешности сличения может превышать величину, установленную ГОСТ 8.558-93 [4], из-за относительной удаленности, как минимум, на две стенки чехла, рабочих спаев контрольного и калибруемого ТП. Превышение установленной величины погрешности в 1°C не позволяет присвоить способу статус периодической поверки рабочих ТП.

Также известен способ проверки соответствия сигналов термоэлектрических преобразователей действительным значениям температуры [5] который позволяет избежать большинства недостатков присущих методам, описанным в MNL-12 и в стандарте AMS 2750C. Способ заключается в том, что показания двух электрически независимых пар термоэлектродов основного ТП сверяют с показаниями проверочного ТП повышенной точности путем введения его на время поверки в зону горячих спаев стационарных термоэлектродов. При этом измеряют ТЭДС каждой пары основных термоэлектродов и сравнивают её со значением ТЭДС проверочного ТП. Реализация способа возможна при использовании конструкции ТП показанной на рис.1. Указанному способу также присущ ряд недостатков.

Введение проверочного ТП в зону горячих спаев стационарных термопар, даже при расположении всех спаев в одном сечении, не может гарантировать идентичность их температуры. Различное пространственное расположение спаев обуславливает различные условия теплопередачи к ним осуществляемой в основном излучением.

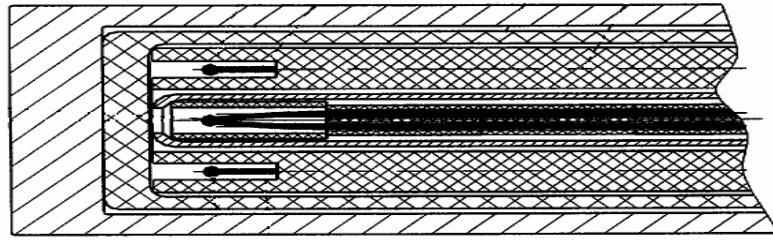


рис.1

Пары термоэлектродов основного ТП размещены в четырех периферийных каналах, имеющих диаметр около 1 мм, керамического изолятора наружным диаметром 8,5 мм с центральным каналом диаметром около 4 мм, и находятся ближе к наружному чехлу, собственно и имеющему температуру окружающей его среды, чем термоэлектроды проверочного ТП помещенного в дополнительную керамическую соломку, вставляемую в центральный канал, что и обуславливает различие в условиях теплопередачи. Такое расположение спаев снижает достоверность сличения по сравнению с регламентируемой ГОСТ 8.338 -02 методикой, где спаи эталонной и поверяемых термопар положено соединять друг с другом для обеспечения идентичности их температуры и следовательно также не гарантирует обеспечение требований ГОСТ 8.558-93 к величине погрешности процедуры сличения. Таким образом, этому способу также не может быть присвоен статус периодической поверки (видимо по указанным причинам авторы и не пытались сделать этого). Вторым существенным недостатком данного способа является невозможность его реализации для ТП с термочувствительным элементом в виде кабельной термопары, так как конструкция таких ТП не предусматривает наличие в них керамических изоляторов.

Задача, решенная специалистами ПК «Тесей», состояла в разработке способа контроля достоверности показаний ТП без демонтажа с термометрируемого объекта с неопределенностью, позволяющей присвоить способу статус периодической поверки и конструкции термоэлектрического преобразователя с кабельной термопарой в качестве термочувствительного элемента позволяющей реализовать предлагаемый способ. Для чего и была разработана конструкция термоэлектрического преобразователя с дополнительным каналом, позволяющим размещать в нем контрольную термопару рис 2.

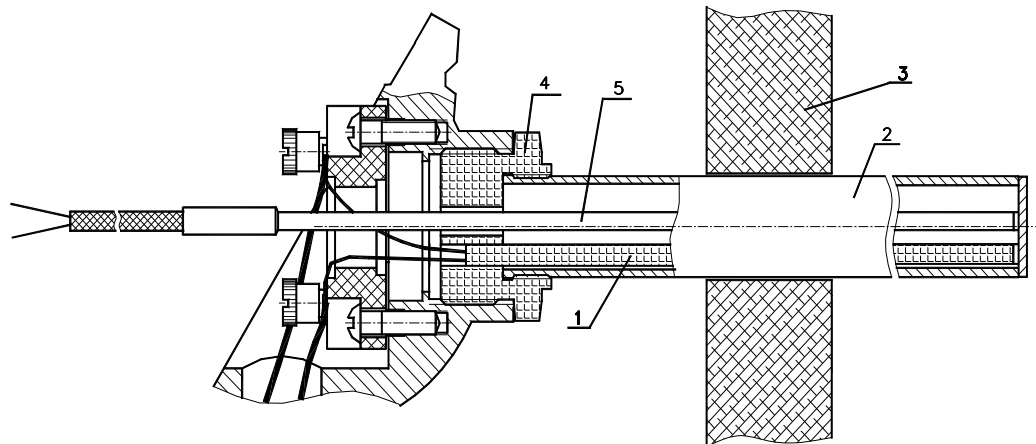


рис.2.

Предлагаемая конструкция ТП содержит термочувствительный элемент 1, изготовленный из термопарного кабеля в металлической оболочке с минеральной изоляцией, защитный чехол 2. Узел крепления термочувствительного элемента 4 обеспечивает, за счет резьбового соединения с чехлом, постоянный гарантированный упор элемента в торец защитного чехла. Отличительной особенностью конструкции является то, что, термочувствительный элемент расположен в защитном чехле несоосно с ним, а узел крепления выполнен со сквозным отверстием, предназначенным для размещения рабочей части контрольного или эталонного средства измерения внутри защитного чехла.

Контроль достоверности осуществляют следующим образом, с помощью ТП, смонтированного на термометрируемом объекте 3, проводят серию измерений на протяжении определенного времени. При этом предполагается, что глубина погружения ТП в объект выбрана такой, что теплопередача вдоль оси термопары за счет теплопроводности не могла оказать существенного влияния на температуру горячего спая термочувствительного элемента. В процессе эксплуатации ТП в термоэлектродах возникает ТЭН. В результате её появления показания ТП принимают значения отличные от первоначальных, следовательно, для определения действительной температуры термометрируемого объекта необходимо произвести калибровку ТП или убедиться, что его показания соответствуют действительности с установленным допуском. Демонтаж и калибровка ТП в других «лабораторных» полях температур могут дать значительную погрешность, т.к. ТЭН проявит себя по иному в температурном поле отличном от того, в котором ТП эксплуатировался. Для того чтобы осуществить калибровку ТП в рабочих условиях во внутреннее пространство защитного чехла помещают рабочую часть контрольной кабельной термопары 5 так, чтобы она тоже гарантированно упиралась в торец защитного чехла. Показания термочувствительного элемента и контрольной термопары сличают на различных уровнях температуры термометрируемого объекта и таким образом осуществляют калибровку, поверку или градуировку ТП без его демонтажа с объекта в процессе эксплуатации.

Размещение контрольной термопары внутри защитного чехла позволяет повысить безопасность и снизить затраты на проведение контроля достоверности показаний по сравнению со способом изложенным в MNL-12.

Применение в качестве контрольного средства кабельной термопары и её размещение с упором в торец защитного чехла позволяет создать идентичные условия теплообмена и обеспечить теплопередачу к рабочим спаям в основном за счет теплопроводности, что практически уравнивает их температуру. Экспериментальная апробация способа показала, что в зависимости от взаимного расположения внутри защитного чехла торцов термочувствительного элемента и контрольной термопары изменение разницы в их показаниях на уровнях температуры от 200⁰С до 1000⁰С составляло от $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$ до $\pm 0,3^{\circ}\text{C}$.

Взяв в качестве контрольной термопары кабельную термопару нихросил - нисил интегральной компоновки наружным диаметром 3мм, метрологические характеристики которой представлены в докладе сотрудников нашей компании **«О ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ КАБЕЛЬНЫХ ТЕРМОПАР НИХРОСИЛ-НИСИЛ В КАЧЕСТВЕ ЭТАЛОННЫХ»**, мы рассчитали в соответствии с рекомендациями EAL-G31 [6] бюджет неопределенности калибровки ТП без его демонтажа с объекта по контрольной термопаре КТНН (смотри табл.1)

Представленные результаты расширенной неопределенности калибровки свидетельствуют о том, что ей вполне возможно придать статус поверки рабочих термопар первого класса. Вопрос только в том, какой метрологический запас считать достаточным. Так если ориентироваться на требование, что расширенная неопределенность поверки должна быть в 2 раза меньше допуска поверяемого средства измерения, заложенное в ГОСТ Р 8.461 (поверка термометров сопротивления), то полученные цифры не полностью удовлетворяют его. В то же время в ГОСТ 8.558-93 в части поверки термопар предусматривает метрологический запас от 20 до 50 % , а значит, полученные цифры вполне удовлетворяют этому требованию.

Табл. 1

Бюджет неопределенности калибровки рабочего ТП по контрольной термопаре КТНН

	к-т влияния	200		400		600		800		1000	
		Величина	Вклад	Величина	Вклад	Величина	Вклад	Величина	Вклад	Величина	Вклад
СКО эталона	1	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06
Неопределенность прибора	1/2	0,06	0,03	0,12	0,06	0,17	0,09	0,23	0,12	0,29	0,15
Единица шкалы прибора	1/√3	0,1	0,06	0,1	0,06	0,1	0,06	0,1	0,06	0,1	0,06
Градуировка эталона	1/2	0,24	0,12	0,25	0,13	0,27	0,14	1,00	0,50	1,16	0,58
Уход эталона	1/√3	0,6	0,35	0,8	0,46	1,00	0,58	1,20	0,69	1,40	0,81
Неопределенность расположения спаев	1/√3	0,1	0,06	0,1	0,06	0,2	0,12	0,2	0,12	0,3	0,17
Стандартная неопределенность измерения действит. Температуры			0,38		0,49		0,62		0,87		1,02
СКО раб. термопары	1	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06
Неопределенность прибора	1/2	0,06	0,03	0,12	0,06	0,17	0,09	0,23	0,12	0,29	0,15
Единица шкалы прибора	1/√3	0,1	0,06	0,1	0,06	0,1	0,06	0,1	0,06	0,1	0,06
Стандартная неопределенность калибровки			0,39		0,50		0,63		0,88		1,04
Расширенная неопределенность калибровки			0,78		1,00		1,26		1,77		2,08

Допуск НН 2 кл	2,5	3	4,5	6	7,5
Допуск НН 1 кл	1,5	1,6	2,4	3,2	4

Описанной выше методике контроля достоверности показаний термоэлектрического преобразователя без его демонтажа с объекта предлагается предать статус методики периодической поверки термоэлектрических преобразователей наряду с действующей по ГОСТ 8.338-2002. Внедрение предлагаемой методики в метрологическую практику позволит не только снизить затраты на проведение периодической поверки, но и повысит её достоверность. В качестве эталонного термоэлектрического преобразователя предлагается использовать кабельные термоэлектрические преобразователи с термоэлектродами нихросил – нисил (КТНН) диаметром 3 или 4,5мм.

Для реализации методики разработана серия кабельных термоэлектрических преобразователей различных типов КТХА (НН, ЖК, ХК) конструктивных модификации 21.ХХ (21.05, 21.06, 21.07, 21.08 и др.), включенных в государственный реестр средств измерений, подробная информация о которых будет представлена в каталоге производимой продукции в июне 2007 года. Авторские права ПК «Тесей» на конструкцию преобразователей серии 21.ХХ защищены решением о выдаче патента на изобретение по заявке № 2006109703/28(010548) с приоритетом от 28.03.2006. На описанный выше бездемонтажный способ контроля достоверности показаний термоэлектрического преобразователя с термочувствительным элементом в виде кабельной термопары подана заявка на изобретение.

Литература:

1. ГОСТ 8.338-2002 Преобразователи термоэлектрические. Методика поверки. ИПК Издательство стандартов, 2003.
2. Рогельберг И.Л., Бейлин В.М. Сплавы для термопар: Справочник. – М.: Металлургия, 1983
3. MNL 12 /Manual on the use of thermocouples in temperature measurement. Fourth Edition. (sponsored by ASTM Committee E20 on Temperature Measurement. ASTM manual series: MNL 12. "Revision of special technical publication (STP) 470B". Includes bibliographical references and index. ISBN 0-8031-1466-4)/.
4. ГОСТ 8.558-93 «Государственная система обеспечения единства измерений. Государственная поверочная схема для средств измерений температуры», Издательство стандартов, 1994
5. Патент RU № 2276338 G01K 7/02, 2006 «Способ проверки соответствия сигналов термоэлектрических преобразователей действительным значениям температуры» Патентообладатель: ОАО «Челябинский завод «Теплоприбор».
6. European cooperation for Accreditation. EA-4/02 "Expression of the Uncertainty of Measurement in Calibration"