

ТВЕРДОТЕЛЬНЫЕ КАЛИБРАТОРЫ ТЕМПЕРАТУРЫ.

Крюков А.В.

Целью данной статьи является анализ некоторых проблем, возникающих при применении твердотельных калибраторов температуры, а также способов их решения в калибраторах НПП «Элемер».

Твердотельные калибраторы температуры постепенно становятся неотъемлемой частью поверочных лабораторий. Они успешно конкурируют с жидкостными термостатами. В некоторых областях применения им просто нет альтернативы. Калибраторы температуры обладают рядом достоинств, о которых необходимо упомянуть:

1. в области температур выше 250°C они являются единственными средствами воспроизведения температуры, не считая реперных точек затвердевания металлов,
2. некоторые калибраторы имеют достаточно высокую точность, позволяющую проводить поверку термометров сопротивления класса А.
3. отсутствует необходимость в вытяжной системе, которая является неизбежным спутником жидкостных термостатов,
4. компактность, малые вес и размеры делают калибраторы незаменимыми при поверке (калибровке) на месте эксплуатации термопреобразователя.

На российском рынке присутствует множество известных иностранных фирм-производителей калибраторов температуры. Кроме того, есть ряд отечественных предприятий, специализирующихся в данной отрасли. Вследствие этого возникает настоятельная потребность в обеспечении общего подхода к этому, достаточно новому, средству воспроизведения температуры. В настоящее время практически единственным документом, призванным регламентировать калибровку и поверку калибраторов, является Европейская рекомендация «Поверка калибраторов температуры» [1]. Здесь приведены основные характеристики калибраторов и описана методика их определения. Хотелось бы, чтобы последовательное применение положений этого документа лежало в основе методики поверки всех выпускаемых калибраторов. К сожалению, данный подход редко реализуется производителями.

1. Виды калибраторов.

Существуют два основных вида калибраторов: со сменной вставкой и цельноблочные. Сразу отметим, что большинство фирм производит калибраторы со сменной вставкой. Это малогабаритные (по размеру термостатирующего блока, но не по общим размерам) калибраторы, позволяющие проводить одновременную поверку (калибровку) обычно только одного термопреобразователя (ТП). Такие калибраторы имеют преимущества при проведении поверки на месте эксплуатации ТП, что, в общем-то, не является повсеместной практикой. Значительно более распространенной является поверка в специализированных лабораториях с использованием высококлассного оборудования. Здесь цельноблочные калибраторы вне конкуренции.

В цельноблочных калибраторах встроенный термометр, температура которого идентифицируется с температурой поверяемых ТП, находится в общем с ними металлическом блоке. Здесь отсутствует воздушный зазор между вставкой (ее просто нет) и основным телом блока. В связи с этим погрешность воспроизведения температуры у цельноблочных калибраторов значительно меньше, чем у калибраторов со сменной вставкой. В последних, для уменьшения погрешности применяют *дополнительный*

термометр повышенной точности, который помещается во вставку вместе с поверяемым ТП. В этом случае калибратор выполняет функции простого термостата.

Цельноблочные калибраторы могут иметь большой диаметр сечения и, потому, несколько каналов для размещения ТП. Это позволяет проводить поверку нескольких ТП *одновременно*. Отсутствие сменной вставки с каналами под ТП вполне компенсируется достаточно большим набором каналов разного диаметра. К недостаткам, с некоторой натяжкой, можно отнести относительно большой вес (10-20 кг). Однако это является и плюсом такой конструкции, так как легко представить, что будет с небольшим калибратором со сменной вставкой, если попытаться поместить в него достаточно часто встречающийся ТП длиной 2-3 метра и диаметром 10 мм.

2. Метрологические характеристики.

Достаточно подробное описание методики измерения характеристик калибраторов приведено в [1]. Здесь же просто перечислим важнейшие составляющие основной погрешности воспроизведения температуры, на основе измерения которых она вычисляется, и дадим краткие пояснения применительно к двум видам калибраторов. Итак, при поверке калибраторов должны быть определены следующие характеристики:

1. погрешность эталонного термометра, применяемого при градуировке калибратора;
2. погрешность прибора, измеряющего сопротивление эталонного термометра;
3. дискретность индикатора температуры;
4. нестабильность поддержания температуры;
5. гистерезис (разница воспроизводимых температур при подходе снизу и сверху);
6. погрешность, связанная с разной загрузкой калибратора;
7. разность температур между основным телом блока и вставкой;
8. разность воспроизведения температуры в различных каналах;
9. неоднородность температурного поля по высоте;
10. нестабильность встроенного термометра за межповерочный интервал.

Первые две величины относятся не к калибратору, а к средствам его поверки. При наличии высококлассной аппаратуры они могут быть сведены к значению, пренебрежимо малому по сравнению с общей погрешностью.

Дискретность индикатора и нестабильность поддержания температуры у современных калибраторов достаточно мала.

Гистерезис и погрешность загрузки присущи, в основном, калибраторам со вставкой.

Разность температур между блоком и вставкой. Отсутствует у цельноблочных калибраторов и значительна у калибраторов со вставкой. В последних эту величину пытаются устранить путем помещения во вставку эталонного термометра и сравнением показаний поверяемого ТП с эталонным. При этом потребитель должен понимать, что такой термометр должен быть сертифицирован и иметь соответствующую методику поверки. Кроме того, из-за различия конструкций и видов поверяемого и эталонного термометров эффективность данного способа может оказаться невысокой.

Разность воспроизводимых температур в различных каналах. Эта величина мала у калибраторов со вставкой вследствие ее малости и фактической «одноканальности» такого калибратора. Цельноблочный калибратор, если он имеет значительный диаметр блока (80-100 мм) с множеством каналов, требует определенных усилий для минимизации

такой погрешности. Впрочем, при грамотном подходе к конструированию калибратора это не является проблемой.

Неоднородность температурного поля по высоте. Обычно рассматривается высота 40 мм от дна канала, что является характерным значением длины чувствительного элемента термометров сопротивления. Значение неоднородности, вследствие «оторванности» вставки от блока, больше у калибратора со сменной вставкой. Более того, помещение в такой калибратор поверяемого ТП приводит к увеличению неоднородности.

Нестабильность встроенных термометров является основной величиной, определяющей долговременную нестабильность калибратора. Встроенный термометр прецизионного калибратора имеет характеристики, не уступающие эталонным термометрам 2 или 3-го разряда. Во всяком случае, только такие применяются в калибраторах серии КТ.

3. Калибраторы температуры серии КТ.

НПП «Элемер» делает акцент на выпуске именно цельноблочных калибраторов, хотя никаких препятствий для производства калибраторов со сменной вставкой нет. Дело в том, что во главу угла при разработке изделий поставлено достижение:

- максимальной точности,
- максимальной производительности поверки.

А этого можно добиться только в цельноблочных калибраторах. Длительный опыт работы («Элемер» выпускает калибраторы уже более 8 лет) и общение с многочисленными потребителями показали правильность сделанного выбора.

В настоящее время «Элемер» выпускает 5 моделей калибраторов, охватывающих диапазон температур от минус 40°C до плюс 1100°C:

- КТ-110 (минус 40...110°C).
- КТ-500 (плюс 50...500°C),
- КТ-650 (плюс 50...650°C),
- КТ-1100 (плюс 300...1100°C),
- КТП-500 (плюс 50...500°C).

(Последний предназначен для поверки и калибровки поверхностных термопреобразователей).

Калибраторы КТ-500, КТ-650 и КТ-1100 - высокоточные приборы, позволяющие проводить поверку термометров сопротивления класса А и термометров 1-го класса. *По метрологическим характеристикам являются лучшими среди всех известных калибраторов. Их трехзонная конструкция не имеет аналогов.* КТ-500 и КТ-650 имеют две модификации в зависимости от конструкции.

КТ-500/М1 – стандартная конструкция. Модификация КТ-500/М1 имеет два класса точности - А и Б. Класс А имеет погрешность примерно в 1,5 раза меньше, чем класс Б (в старых обозначениях – это КТ-500), что составляет примерно 0,2°C при 500°C. Такая высокая точность позволяет проводить поверку ТП с унифицированным выходным сигналом класса 0,1.

В модификациях КТ-500/М2 и КТ-650/М2 наряду со стандартным набором каналов предусмотрен дополнительный центральный канал Ø37 для размещения ампулы реперной точки затвердевания индия, олова, цинка. Ампулы могут входить в комплект поставки калибратора, что позволяет проводить поверку эталонных термометров 1 и 2-го разрядов. Также в этот канал можно поместить вставку с набором отверстий и проводить поверку

ТП повышенной точности путем сравнения с эталонным термометром 1-го или 2-го разряда. Погрешность данного метода составляет $0,02^{\circ}\text{C}$ при 50°C и $0,06^{\circ}\text{C}$ при 500°C .

Калибратор КТ-110 уникален диапазоном воспроизводимых температур: он легко достигает температуры минус $30\text{--}35^{\circ}\text{C}$ (или минус 45°C при подключении водяного охлаждения). *В России подобных калибраторов нет, и немногие зарубежные калибраторы могут конкурировать с КТ-110 по нижнему пределу измерений, заведомо уступая ему в точности.* В настоящее время прошла испытания модификация калибратора КТ-110М, в которой верхний предел воспроизведения увеличен до 150°C , а погрешность воспроизведения заметно уменьшена. Так, при 0°C погрешность составляет $0,04^{\circ}\text{C}$, что позволяет поверять термометры сопротивления класса А.

4. Влияние глубины погружения.

Одной из составляющих общей погрешности, возникающей при передаче температуры от калибратора к поверяемому ТП, является погрешность, связанная с теплоотводом по ТП. Согласно [1], «...данная погрешность не является частью погрешности калибратора, тем не менее, ее необходимо принимать во внимание отдельно...». Очевидным способом уменьшения этой погрешности является увеличение глубины погружения ТП. Однако это ограничено конструкцией калибратора. Известные требования к глубине погружения ТП [2,3] относятся к конкретным видам термостатов (или печей), в которых острой является проблема создания однородного температурного поля, и не могут применяться к современным калибраторам температуры, являющимися новыми средствами воспроизведения температуры. По непонятным причинам разработчики ГОСТов игнорируют калибраторы температуры, упорно рекомендуя печи с высокими градиентами температуры (до $0,8^{\circ}\text{C}/\text{см}$), в то время как КТ-1100 имеет максимальную неоднородность $0,8^{\circ}\text{C}$ в термостатирующем блоке длиной 50 мм.

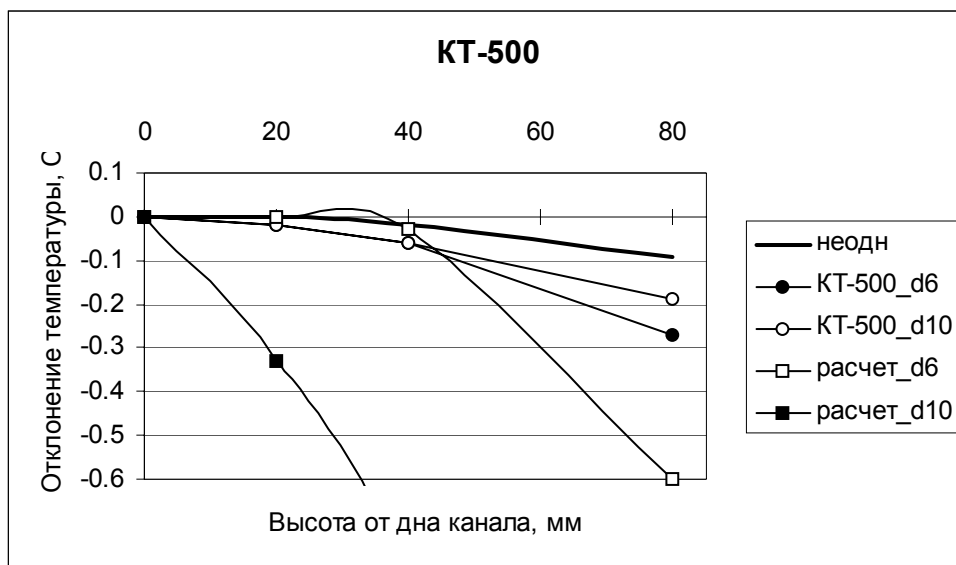
Принято [4], что в свободной воздушной среде с перемешиванием достаточно глубины погружения в 15 диаметров ТП плюс длина его чувствительного элемента. В калибраторах эта глубина может быть другой. В [5] приведены экспериментальные данные, позволяющие оценить погрешность, связанную с теплопроводностью термометра в калибраторах. Здесь, для того, чтобы получить погрешность, например, менее $0,02\%$ ($0,1^{\circ}\text{C}$ при 500°C или $0,02^{\circ}\text{C}$ при 100°C), необходимая глубина погружения должна превышать 17 диаметров поверяемого ТП, что для $\varnothing 6$ и $\varnothing 10$ составляет соответственно 100 и 170 мм (плюс длина чувствительного элемента). Расчеты и измерения [5] проведены для простого калибратора, состоящего из одного регулируемого блока.

В калибраторах серии КТ влияние теплоотвода по ТП сведено к минимуму. Как уже говорилось, КТ имеют трехзонную конструкцию. Основной термостатирующий блок защищен сверху и снизу дополнительными блоками, температура которых поддерживается на некотором уровне по отношению к температуре основного блока. Эта разность температур изменяется в зависимости от воспроизводимой температуры по определенному закону для каждого блока. Необходимая разность температур подбирается при градуировке и является индивидуальной для каждого блока каждого калибратора.

Такая настройка калибратора приводит к заметному улучшению его характеристик:

- неоднородность температуры в рабочей зоне 0-40 мм составляет несколько сотых градуса во всем температурном диапазоне калибратора ($50\text{...}500^{\circ}\text{C}$ или $50\text{...}650^{\circ}\text{C}$),
- уменьшается погрешность, связанная с теплопроводностью по ТП.

Влияние теплопроводности по ТП всегда может быть оценено путем его поднятия на некоторую высоту от дна канала. Результаты таких измерений для КТ-500 (у него глубина каналов 190 мм) приведены на рис.1. Измерения проводились для ТП двух диаметров, 6 и 10 мм, с длиной чувствительного элемента порядка 40 мм. На этом же рисунке приведены значения неоднородности температуры, измеренные специально сконструированным термометром сопротивления с длиной элемента порядка 5 мм (это - практически точечный термометр), а также результаты расчета для однозонного калибратора на основе данных [5]. Температура калибратора равнялась 300°C.



Основные выводы, следующие из анализа графиков, таковы.

1. Неоднородность температуры порядка 0,05°C распространяется на зону до 60 мм.
2. Результаты, полученные для Ø10, резко контрастируют у КТ-500 и однозонного калибратора. Здесь ясно видны преимущества КТ-500: поднятие ТП на 40 мм, что соответствует глубине погружения в 11 диаметров (плюс длина чувствительного элемента), не приводит к заметному изменению его температуры.
3. Дополнительная погрешность для ТП с глубиной погружения 120 мм (или 70 мм от дна канала) не превышает 0,25°C и практически не зависит от диаметра.
4. Принципиального различия в показаниях термометров с разными диаметрами нет.

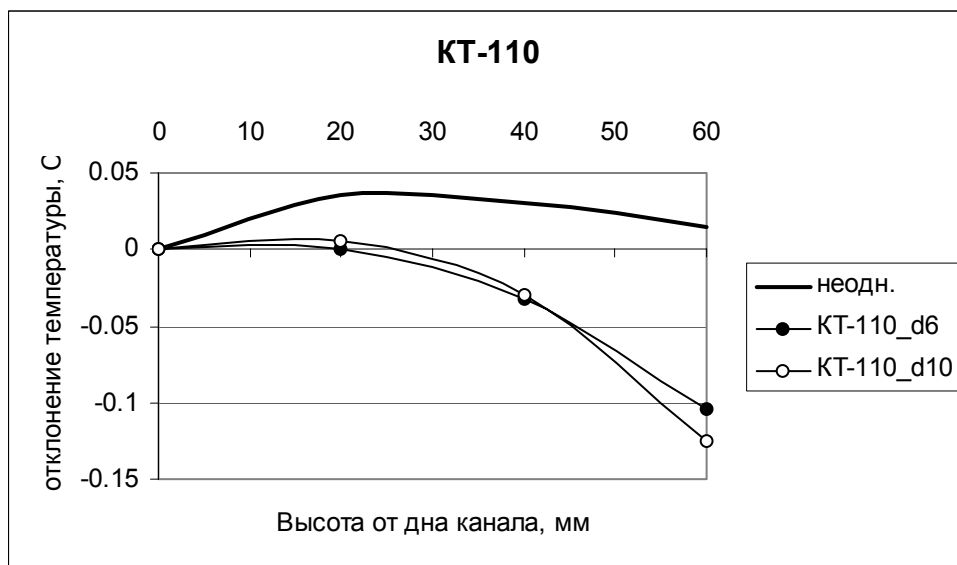
Отметим необычность, в рамках стандартных представлений о глубине погружения, пункта 4. Возможно, такое поведение термометров связано с трехзонной конструкцией КТ-500 (КТ-650). Однако результаты, полученные для однозонного КТ-110 (см. ниже), столь же непривычны.

Необходимо помнить, что значения, как неоднородности температуры, так и дополнительной погрешности, прямо зависят от температуры и для более низких температур будут меньше приведенных на рисунке.

Несколько иной подход к уменьшению влияния теплоотвода применен в КТ-110. Этот калибратор, в силу специфики получения низких температур, не может иметь ни большие размеры, ни дополнительные зоны. У КТ-110 небольшое поперечное сечение блока порядка 41x41 мм и глубина каналов 160 мм. Чтобы уменьшить влияние теплоотвода по ТП, в КТ-110 применена несимметричная установка термомодулей (элементов Пельтье) для создания небольшого, встречного теплоотводу, градиента по блоку. Это привело к

незначительному увеличению неоднородности температуры, но одновременно позволило уменьшить погрешность, обусловленную теплопроводностью.

Результаты измерений влияния теплоотвода в КТ-110 приведены на рис.2. Температура калибратора равнялась 110°C. Видно, что изменение глубины погружения приводит к практически одинаковым отклонениям как для Ø6, так и для Ø10. Кстати, примерно такая же картина наблюдалась и в случае с КТ-500, что противоречит данным [5], говорящим об экспоненциальной зависимости погрешности от диаметра ТП.



Все это требует отдельного рассмотрения и более тщательного анализа. В рамках же настоящего сообщения, не вдаваясь в детальное обсуждение полученных результатов, отметим следующий очень важный факт.

ВЫВОД 1. *Благодаря специальной конструкции калибраторов НПП «Элемер» конечная глубина их каналов не приводит к появлению заметной дополнительной погрешности поверки (калибровки) ТП.*

И, наконец, чтобы проверить правильность подхода к конструированию калибраторов температуры (в плане уменьшения влияния теплоотвода), необходимо было провести «правильную» калибровку ТП и сравнить ее с полученной в калибраторе. «Правильной» будем называть калибровку в жидкостном термостате с применением внешнего эталонного термометра при большой глубине погружения поверяемого и эталонного термометров. В связи с тем, что погрешность прямо зависит от температуры, измерения проводились при максимальной для жидкостных термостатов температуре 250°C (КТ-500) и 110°C (КТ-110). Поверяемый ТП имел диаметр 10 мм (наихудший вариант для твердотельного калибратора), глубину погружаемой части 400 мм и погружался в жидкостной термостат с медным тепловыравнивающим блоком на 300 мм, что гарантировало идеальные условия для его поверки.

Результаты измерений ТП в КТ-500 совпали с результатами «правильной» калибровки в пределах 0,05°C. Поскольку погрешность КТ-500 при 250°C составляет 0,12°C (класс А КТ-500) и 0,2°C (класс Б КТ-500), совпадение следует признать неплохим. Для КТ-110 отличие от «правильной» калибровки не превышало 0,01°C.

Несколько меньше проблем возникло с высокотемпературным калибратором КТ-1100. Во-первых, глубина его каналов достаточно велика (270 мм), во-вторых, его допускаемая погрешность больше, чем у других калибраторов. Тем не менее, и здесь для выравнивания температурного поля применяется трехзонная конструкция.

ВЫВОД 2. *В калибраторах КТ-500, КТ-650, КТ-110 необходимая глубина погружения не превышает 160 мм даже для ТП с диаметром 10 мм и длиной чувствительного элемента 40 мм.*

Очень важный вывод, перекликающийся с выводом 1 и позволяющий использовать калибраторы НПП «Элемер» для поверки ТП самого высокого класса, причем с относительно небольшой длиной погружаемой части.

5. Некоторые заблуждения.

В статьях, посвященных твердотельным калибраторам, в паспортах приборов можно встретить утверждения и формулировки, к которым хотелось бы дать короткие комментарии.

№ 1. *«Метод непосредственного сличения с внешним эталонным термометром позволяет значительно повысить точность поверки».*

Основной тезис многих производителей, призванный хоть в какой-то степени сгладить недостатки их калибраторов. Причем обычно речь идет даже не об эталонном термометре, а о термометре *повышенной точности*.

1. Вследствие неоднородности температуры по высоте, это верно только для некоторых видов ТП. Дело в том, что разные виды ТП имеют разные чувствительные элементы: термопары - точечные, пленочные термометры - малые (5 мм), проволочные – протяженные (до 50 мм). Они располагаются на разной высоте, поэтому метод сравнения только тогда будет эффективен, когда поверяемый и эталонный термометры будут иметь примерно одинаковую длину чувствительного элемента. А это всего лишь частный случай.
2. Поверяемый и эталонный термометры должны иметь достаточно близкую конструкцию. Это отчетливо понимают авторы [6], нигде, однако, не упоминая о влиянии неоднородности температурного поля по высоте.
3. И, наконец, данное утверждение актуально, в основном, для калибраторов со сменной вставкой.

№ 2. *«Для поверки ТП с погрешностью в 0,3°C применяется калибратор температуры с погрешностью 0,3°C».*

1. Если погрешность составляет 0,3°C, то, имея в виду метрологический запас 1:3, такой калибратор можно применять для поверки ТП с погрешностью 0,9°C и больше.
2. Иногда допускаемая погрешность воспроизведения приводится в виде зависящей от температуры величины (калибраторы серии КТ). В этом случае требуется сравнение погрешности калибратора и допускаемой погрешности ТП в каждой из поверяемых точек.
3. В развитие п.2. Следует помнить, что допускаемая погрешность термометров сопротивления и термопар примерно пропорциональна температуре. Поэтому

погрешность калибратора в $0,3^{\circ}\text{C}$ имеет разное влияние на результаты при поверке ТП при 0°C и, например, при 300°C .

№3. «Градиент по высоте не более ... $^{\circ}\text{C}/\text{см}$ ».

Неправильное применение термина. Обычно градиент по высоте не является постоянной величиной. При высотах от дна канала 0 и 40 мм можно получить одинаковые показания ТП и, соответственно, градиент, равный нулю. В то же время на промежуточной высоте в 20 мм может быть отклонение в несколько десятых градуса. Поэтому правильно говорить не о градиенте, а о *неоднородности температурного поля и измерять ее в $^{\circ}\text{C}$, а не в $^{\circ}\text{C}/\text{см}$* . Именно такая характеристика присутствует в [1].

№4. «Глубина каналов калибратора равна 100 (120) мм»

Такой калибратор может использоваться только для *качественного* анализа характеристик ТП.

ЛИТЕРАТУРА

1. EA-10/13/. EA Guidelines on the Calibration of Temperature Block Calibrators.
2. ГОСТ 8.461-82. Термопреобразователи сопротивления. Методы и средства поверки.
3. ГОСТ 8.338-2002. Термопреобразователи термоэлектрические. Методика поверки.
4. МЭК 751. Термометры сопротивления платиновые, промышленные.
5. Джон.П. Тавенер. Глубина погружения.
6. Е.В.Васильев. Новое метрологическое оборудование на основе твердотельных микропроцессорных термостатов для контактной термометрии». «Главный метролог». №3, 2001 г.