

Достоверность измерения температуры термоэлектрическими преобразователями и методика их периодической поверки.

А.В. Белевцев

главный метролог Производственной компании «Тесей»,

г. Обнинск

А.В. Каржавин

директор Производственной компании «Тесей»,

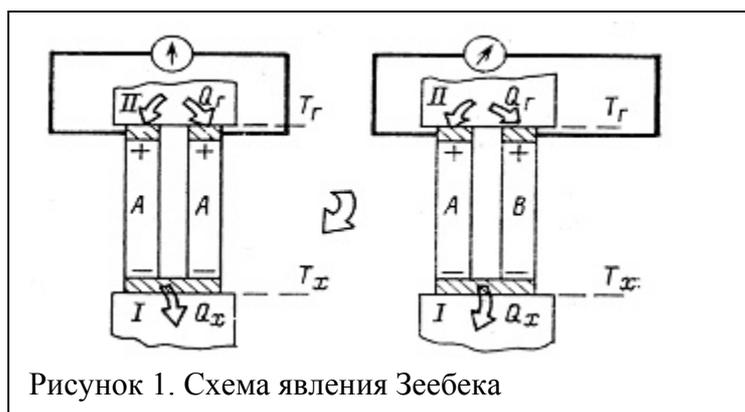
г. Обнинск

В.А. Каржавин

инженер-исследователь Производственной компании «Тесей»,

г. Обнинск

Основная часть всех температурных измерений в промышленности и научных исследованиях приходится на долю термоэлектрических преобразователей (ТП), чувствительными элементами которых являются термопары. Метод измерения температуры с помощью термопары основан на эффекте Зеебека: в цепи, состоящей из последовательно соединённых различных проводников, возникает электрический ток, если в местах контактов поддерживается различная температура. Схема, иллюстрирующая эффект Зеебека представлена на рис. 1



Отсутствие понимания физической основы явления приводит к неправильной эксплуатации ТП и получению недостоверных результатов. Одним из способов повышения точности измерений принято считать периодическую поверку ТП. Понимание того, что же даёт поверка, т.е. что же мы определяем при её проведении, невозможно без понимания физических основ термоэлектричества.

Упрощенно возникновение ТЭДС в металлах и сплавах можно объяснить, опираясь на теорию электронного газа П. Друде. В модели, предложенной П. Друде [1], металл рас-

смаывается как решетка атомов, на внешних орбиталях которых находятся валентные электроны, слабо связанные электромагнитными силами с ядром атома. Валентные электроны можно считать свободными частицами, так как они легко могут переходить от одного атома к другому. Эти электроны в металлах называют электронами проводимости. Система свободных электронов при отсутствии внешних воздействий находится в равновесии. Средняя скорость электронов равновесной системы равна нулю, хотя каждый из электронов обладает конечной энергией и скоростью, пропорциональной локальной температуре металла.

При изменении температуры вдоль проводника система электронов отклоняется от равновесного состояния. Средняя скорость электронов в области горячего конца проводника становится отличной от нуля, а вектор скорости направлен в сторону области с более низкой температурой. Поскольку электроны являются носителями заряда, наличие такой скорости приведет к возникновению электрического тока. Но электрическая цепь разомкнута, и поэтому электрический ток существует лишь до тех пор, пока в более холодной области не накопится заряд, достаточный для создания замедляющего электрического поля. Это поле противодействует дальнейшему накоплению заряда и в точности компенсирует влияние градиента температуры на среднюю скорость электронов. Когда достигается новое равновесное состояние, электрический ток в цепи исчезает.

Таким образом, при наличии градиента температуры в проводнике возникает электрическое поле, направленное навстречу градиенту температуры. Различие в числе электронов на концах проводника и ток в цепи существуют до тех пор, пока есть градиент температуры. Соответственно градиент потенциала электрического поля, собственно и являющийся ТЭДС, не может возникнуть без температурного градиента. Авторы [2] считают описанный механизм основной причиной возникновения ТЭДС и называют ее **диффузионной составляющей ТЭДС**. Она доминирует в чистых металлах при температурах выше температуры Дебая и является основной составляющей ТЭДС, возникающей во всем температурном диапазоне применения для сплавов, содержащих несколько процентов легирующих элементов.

Величина ТЭДС $E_A(T)$, возникающей на однородном проводнике А, определяется как:

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

где $S_A(T)$ – локальная чувствительность участка проводника.

Из выражения (1) следует, что:

$$S_A(T) = \frac{dE}{dT}. \quad (2)$$

Формула (2) выражает абсолютный коэффициент Зеебека локального участка – физическую характеристику любого электропроводящего материала, которая не зависит от наличия других материалов в цепи.

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

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

Коэффициент Зеебека пары проводников АВ S_{AB} представляет собой разность коэффициентов Зеебека материала А и материала В:

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

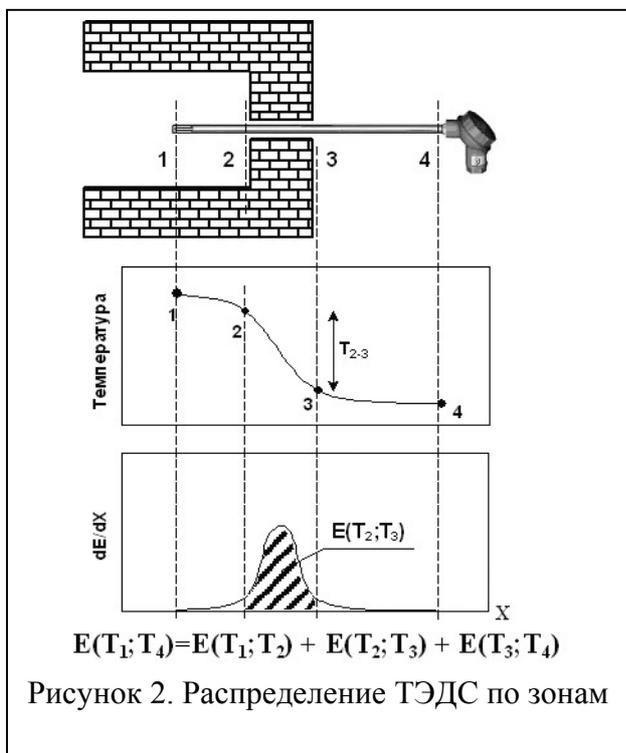
Коэффициент Зеебека S_{AB} , характеризующий изменение E_{AB} в зависимости от температуры, называют также коэффициентом ТЭДС, дифференциальной ТЭДС или чувствительностью термопары. Для большинства пар металлов и сплавов S_{AB} имеет порядок 10^{-5} – 10^{-4} В/К.

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]. Исходная ТЭН термоэлектродной проволоки возникает при ее изготовлении, развивается в процессе изготовления термопар и представляет собой, как правило, небольшие колебания ТЭДС. У отработавших некоторое время термопар ТЭН термоэлектродов является результатом наложения исходных неоднородностей и неоднородностей, развивающихся в процессе эксплуатации вследствие ряда причин: изменения состава сплава за счет избирательного окисления, испарения или связывания в соединения отдельных элементов сплава; поглощения элементов извне при взаимодействии с изолирующими материалами и окружающей средой; рекристаллизации, роста зерна; превращений в твердом состоянии (упорядочения, распада твердого раствора). 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 (см. формулу 3). На участках с постоянной температурой ТЭДС не генерируется.

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

Применение методики поверки, изложенной в ГОСТ 8.338-2002, при периодической поверке ранее эксплуатировавшихся, а значит неизбежно приобретших ТЭН ТП, зачастую приводит к заведомо ложным результатам. Так реально поверка по ГОСТ 8.338-2002 производится при глубине погружения 250-300 мм и её результаты будут действительны только для этой глубины погружения. ТП в условиях эксплуатации же помещаются в печь на 500 мм и более. Участок основного градиента температур, как правило, приходится на часть термопары, расположенную в зоне футеровки печи. Это иллюстрирует рисунок 2. Следовательно, участок длиной 250-300 мм расположен в зоне практически равномерной температуры и генерируемая на нём величина термо-э.д.с. значительно меньше, чем на участке основного градиента.



Можно утверждать, что ТП, помещенный 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 [3]. Тем более нельзя применять ранее использовавшуюся термопару на глубине погружения меньшей той, при которой проводилась поверка.

Для иллюстрации вышесказанного приведем результаты наших исследований (рис 3-5):

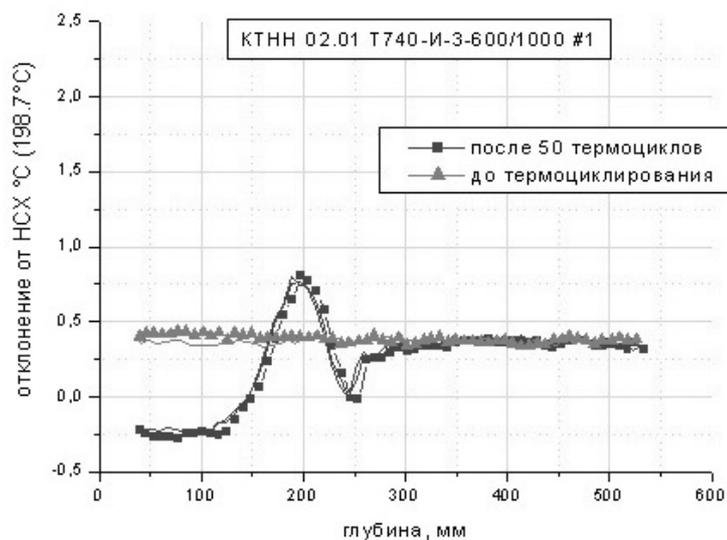


Рисунок 3.

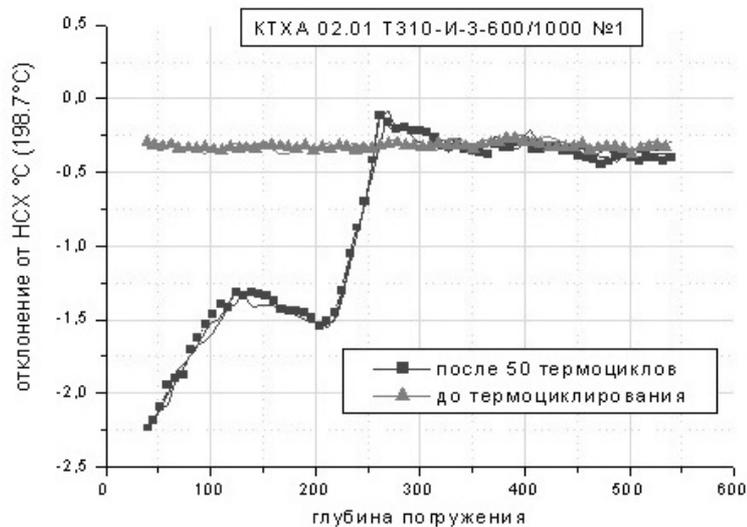


Рисунок 4.

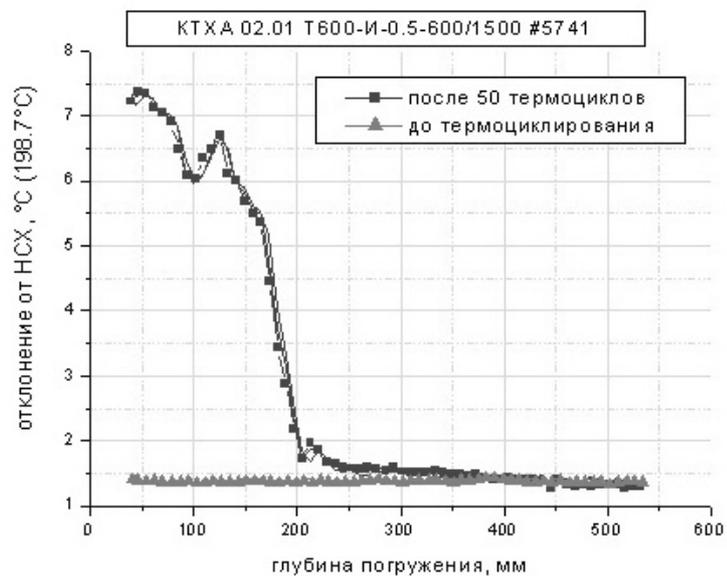


Рисунок 5.

Представлены результаты исследования однородности кабельных ТП диаметром 3мм типа КТНН рис 3, типа КТХА рис 4 и КТХА диаметром 0,5мм рис.5 до и после циклического воздействия на них температуры. Режим термоцикла приведен на рис.6.

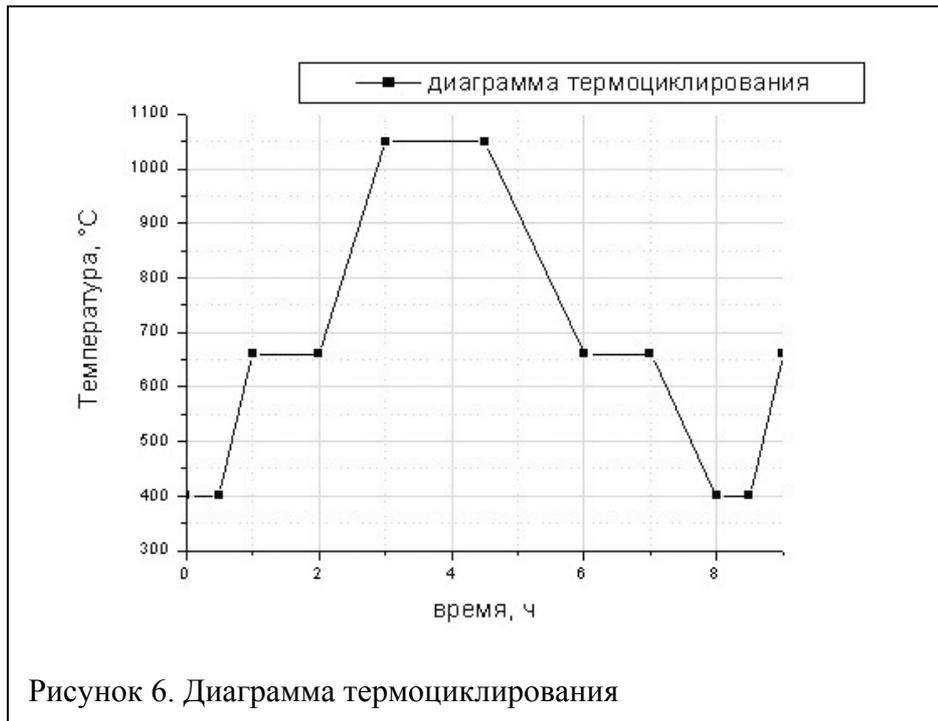


Рисунок 6. Диаграмма термоциклирования

Глубина погружения в печь при проведении термоциклирования составляла 250мм . Процедура определения неоднородности состоит в проведении непрерывных измерений показаний ТП при их погружении с постоянной скоростью 50 мм/мин в масло разогретое до 200°С. Из приведенных графиков видно, что изначально показания ТП не зависят от глубины их погружения и следовательно, их термоэлектроды однородны. После термоциклирования разница в показаниях в зависимости от глубины погружения для ТП типа ХА диаметром 3 мм составила 2°С, для ТП диаметром 0.5 мм 6°С, для ТП типа НН диаметром 3 мм 0.5°С.

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

На нецелесообразность периодической поверки в лабораторных условиях (что предусматривает методика ГОСТ 8.338-2002) указывается в международных нормативных документах. Так в стандарте ASTM International E220-02 [4], регламентирующем калибровку ТП методом сравнения, вообще не рассматривается возможность калибровки ранее эксплуатировавшихся ТП, в частности п. 6.3 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.»

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».

Аналогичная точка зрения изложена в рекомендациях (EAL-G31) Европейской ассоциации по аккредитации лабораторий для гармонизации процесса калибровки (поверки) ТП в различных лабораториях.

Мы также считаем, что только такой подход к калибровке ТП является единственно верным, и пытаемся внедрить его в практическую термометрию.

Так как периодическая поверка имеет смысл лишь тогда, когда проводится в тех же условиях, что и эксплуатационные, а их невозможно воспроизвести в лабораторных услови-

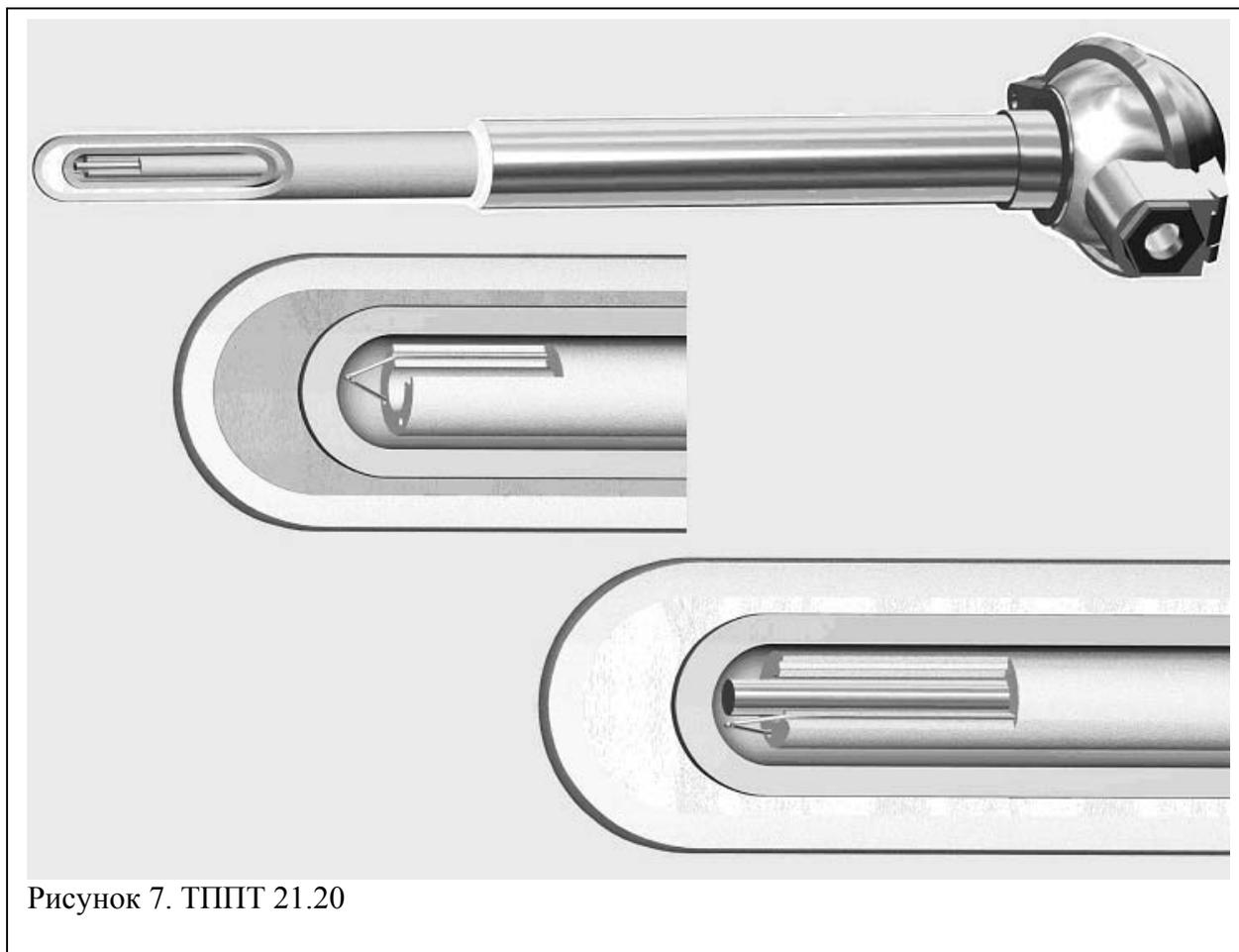


Рисунок 7. ТППТ 21.20

ях, необходимо производить калибровку термопар непосредственно на месте их эксплуатации. Для этого нашей компанией были разработаны две конструкции ТП КТХА 11.06 и ТППТ 11.20, предусматривающие возможность установки эталонной термопары рядом с рабочим чувствительным элементом без демонтажа термопреобразователя с объекта, позволяющие проводить сличение показаний рабочей и эталонной термопар, т.е. проводить бездемонтажную калибровку. Вопрос о придании такой калибровке статуса периодической поверки ещё предстоит формально узаконить и над этой проблемой мы работаем. Однако, на наш взгляд, уже сегодня метрологические службы предприятий в праве её «узаконить» в рамках своих полномочий.

В качестве эталонных термопар мы предполагаем использовать кабельные термоэлектрические преобразователи КТННЭ и КТППЭ, конструкции которых защищены патентами на полезную модель № 39200 [5] “Эталонный термоэлектрический преобразователь” и № 39704 [6] “Платиновый эталонный термоэлектрический преобразователь”.

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. В настоящее время нами исследуется метрологическая стабильность и разрабатывается методика определения термоэлектрической неоднородности указанных термопар. Полученные данные частично представленные в настоящем докладе позволяют надеяться, что в следующем году мы сможем сертифицировать эталонные кабельные ТП типов НН и ПП, а также разработать и утвердить методику их поверки с учётом неоднородности.

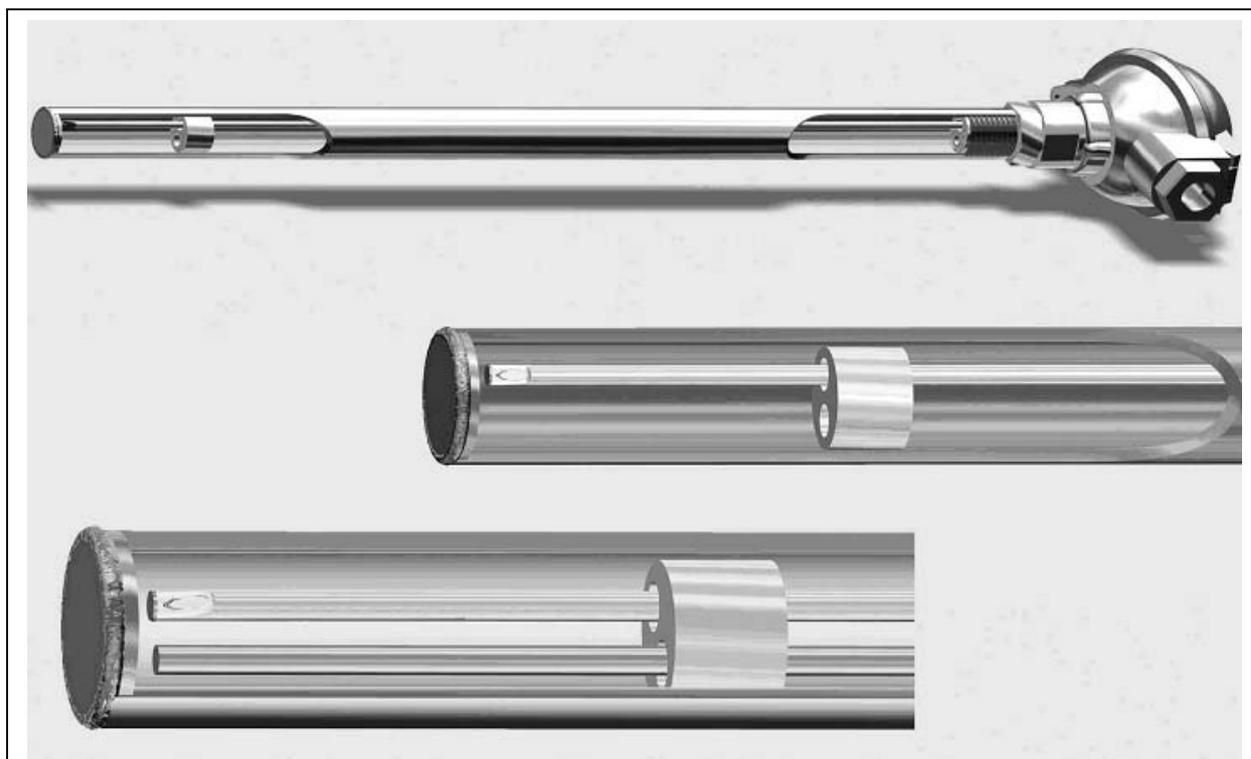


Рисунок 8. КТХА 21.06

Список литературы:

1. Борн М. Атомная физика. – М.: Мир, 1965.
2. Рогельберг И.Л., Бейлин В.М. Сплавы для термопар: Справочник. – М.: Metallurgia, 1983
3. А.В. Белевцев, А.В. Каржавин, В.А. Каржавин. Периодическая поверка термоэлектрических преобразователей - «Компетентность», №1, 2005
4. ASTM E220-02. Стандартный Метод Испытания для Калибровки Термопар Методами Сравнения
5. Полезная модель № 39200 “Эталонный термоэлектрический преобразователь”
6. Полезная модель № 39704 “Платиновый эталонный термоэлектрический преобразователь”.