

Изобретение относится к способам измерения температуры с помощью термопар и может быть использовано для повышения точности измерения температуры труднодоступных объектов и агрессивных сред в течение длительного времени без дополнительной градуировки.

Известен способ определения абсолютной температуры термопарой [Линевет Ф. Измерение температуры в технике. Справочник, пер. с нем. М.: Металлургия, 1989, с.65], заключающийся во внесении рабочего конца термопары в среду, температуру T_x которой контролируют, измерении термо-ЭДС E , возникающей на свободных концах термопары, и определении абсолютной температуры по градуировочной характеристике термопары с учетом абсолютной температуры T_0 ее свободных концов $T_x - T_0 = E/\varepsilon$, где ε - коэффициент чувствительности термопары. Из-за временных изменений термо-ЭДС, которые возникают в процессе длительной эксплуатации (в результате структурных изменений, влияния испарения, окисления, коррозии и диффузии примесей в рабочем конце) понижается точность измерения абсолютной температуры, особенно агрессивных сред,¹ Вследствие случайного характера изменения термо-ЭДС, а следовательно, и чувствительности термопары, которая определяется коэффициентом Зеебека, под влиянием различных факторов при разных температурах и диаметрах термоэлектродной проволоки, нельзя дать надежный прогноз об их сроке службы с заданной точностью в труднодоступных объектах или агрессивных средах.

Применение встроенных калибраторов температуры [Саченко А.А., Мильченко В.Ю., Коган В.В. Измерение температуры датчиками со встроенными калибраторами. М.: Энергоатомиздат, 1986, с.22] не дает существенного повышения точности измерения в процессе длительной эксплуатации термопар из-за химического взаимодействия реперного материала с корпусом калибратора или термоэлектродами термопары, что приводит к изменению его чистоты, а следовательно, температуры расплава материала. Во многих объектах температура рабочего конца термопары задается ходом технологического процесса в регулируемом объекте и ее невозможно изменять до температуры плавления (фазового перехода) реперного материала, нарушая тем самым технологический регламент. Применение сменных калибраторов на разные температуры затруднено, особенно в труднодоступных объектах. Известен также способ определения абсолютной температуры термопарой [Авт. св. СССР Ms 777475, кл. G 01 K 7/02, 1980], заключающийся во внесении рабочего конца термопары в среду, температуру которой контролируют, стабилизации температуры свободных концов, измерении термо-ЭДС, возникающей на свободных концах термопары, дополнительном нагреве рабочего конца термопары пропусканием тока через термоэлектроды, измерении установившегося значения термо-ЭДС, определении отношения измеренных термо-ЭДС, и определении искомой температуры T_x по формуле:

$$T_x = \frac{\pi \cdot I}{\lambda (\kappa - 1)},$$

где π - коэффициент (ЭДС) Пельтье;

I - ток, пропускаемый через рабочий конец термопары;

$\kappa = E_2/E_1$ - отношение измеренных термо-ЭДС;

λ - теплопроводность рабочего конца термопары.

В приведенную формулу не входит чувствительность термопары S , которая определяется коэффициентом Зеебека материала рабочего конца. Поэтому ее изменение в процессе эксплуатации термопары не влияет на результат измерения. Однако, результат измерения косвенно зависит от непостоянства коэффициента Зеебека, так как коэффициент Пельтье, согласно соотношению Кельвина, функционально связан с коэффициентом Зеебека и температурой рабочего конца. Кроме того, на результат измерения температуры существенное влияние оказывает непостоянство эквивалентной теплопроводности рабочего конца термопары, которая зависит не только от теплопроводности термоэлектродов, но и от теплоотдачи рабочего конца в контролируемую среду, которая в теплофизическом смысле не остается постоянной.

В основу изобретения положена задача создания такого способа определения температуры термопарой, в котором новое выполнение операций измерения термо-ЭДС и нагрева рабочего конца и новая расчетная формула для измерения температуры позволили бы исключить влияние непостоянства чувствительности термопары и температуры рабочего конца на вычисленное значение температуры по результатам измеренных термо-ЭДС, благодаря чему повысилась бы надежность способа.

Поставленная задача достигается тем, что в способ определения абсолютной температуры термопарой, заключающийся во внесении рабочего конца термопары в среду, температуру которой контролируют, стабилизации температуры свободных концов, измерении термо-ЭДС, возникающей на свободных концах термопары, дополнительном нагреве рабочего конца термопары, пропускании тока через термоэлектроды, и определении температуры по формуле, согласно изобретения, до дополнительного нагрева рабочего конца его термо-ЭДС измеряют 10-20 раз и определяют ее среднеарифметическое значение и среднеквадратичное отклонение, дополнительный нагрев рабочего конца производят в течение времени, меньшем тепловой постоянной времени термопары, при этом ток дополнительного нагрева выбирают из условия превышения измеренной термо-ЭДС к концу времени нагрева на 100-200 значений порога чувствительности термопары, выраженного в среднеквадратичном отклонении ранее измеренной термо-ЭДС, а абсолютную температуру T_x определяют по формуле

$$T_x = \frac{(\bar{E}_1 + E_0)^2 I_0 \Delta t}{(E_2 - \bar{E}_1) \hat{C} m},$$

где \bar{E}_1 - среднее значение измеренной термо-ЭДС до дополнительного нагрева рабочего конца;

E_2 - измеренная термо-ЭДС в конце времени нагрева;

E_0 - термо-ЭДС свободных концов термопары;
 I_0 - ток, пропускаемый через рабочий конец термопары;
 Δt - время пропускания тока;

\bar{C} - усредненная удельная теплоемкость рабочего конца термопары;

m - масса рабочего конца термопары.

Целесообразно, чтобы теплоемкость рабочего конца термопары определяли в процессе калибровки термопары в среде с известной абсолютной температурой T_0' по формуле:

$$C = \frac{(E_1' + E_0)^2 I_0' \Delta t'}{(E_2' - E_1') T_0'},$$

где E_1' , E_2' , I_0' , $\Delta t'$ - величины, измеренные при определении известной температуры рабочего конца T_0 .

Целесообразно, чтобы термо-ЭДС свободных концов термопары определяли по двум известным значениям абсолютной температуры T_0' и T_0'' среды по формуле:

$$E_0 = \frac{R \bar{E}_1' - \bar{E}_1''}{1 - R},$$

$$\text{где } R = \sqrt{\frac{T_0''}{T_0'} \left(\frac{E_2'' - E_1''}{E_2' - E_1'} \right)},$$

\bar{E}_1' , \bar{E}_2' , \bar{E}_1'' , и \bar{E}_2'' - термо-ЭДС, измеренные при определении известных температур T_0' и T_0'' среды.

Введение новых операций, направленных на получение усредненного результата измерения термо-ЭДС рабочего конца до его дополнительного нагрева и получение оценки его среднеквадратичного отклонения, позволяют выбрать ток нагрева и произвести в течение временного интервала, меньшего тепловой постоянной времени термопары, что позволит исключить влияние теплофизических параметров контролируемой среды на перегрев рабочего конца относительно температуры окружающей среды. Новая расчетная формула включает измеряемые величины и параметры термопары, определяемые через ее геометрические размеры.

Введены также новые операции, позволяющие в процессе калибровки термопары в среде с устанавливаемой температурой определить теплоемкость рабочего конца и термо-ЭДС свободных концов термопары без расчета этих параметров по геометрическим размерам и свойствам материалов термоэлектродов.

На чертеже представлен вариант схемы термоэлектрического устройства для осуществления предлагаемого способа.

Устройство содержит двухэлектродную термопару 1, удлинительные термоэлектроды 2, термостат 3 с размещенными в нем свободными концами термопары 1, двухполюсный переключатель 4, цифровой милливольтметр 5, цифровой амперметр 6 и регулируемый источник 7 постоянного тока.

Переключатель 4 служит для поочередного подключения к свободным концам термопары 1, милливольтметра 5 или регулируемого источника 7 тока. Предлагаемый способ термоэлектрического измерения температуры осуществляют в следующей последовательности.

Рабочий конец термопары 1 вносят в контролируемую среду с абсолютной температурой T_x , а удлинительные термоэлектроды 2 соединенные со свободными концами термопары 1, помещают в термостат 3. Переключатель 4 переводят в нижнее положение, при котором выход термопары соединяют с милливольтметром 5. Термостат 3 поддерживает постоянную абсолютную температуру T_0 . Поэтому милливольтметром 5 измеряют разностную термо-ЭДС

$$E_1 = \varepsilon_1 T_x - \varepsilon_0 T_0, \quad (1)$$

где ε_1 и ε_0 - коэффициенты Зеебека, соответственно, рабочего и свободных концов термопары.

Рабочий конец термопары 1 длительное время находится при переменной температуре T_x в условиях действия дестабилизирующих факторов. Поэтому чувствительность рабочего конца к температуре не остается постоянной

$$\varepsilon_1 = f(T_x, Z_1, Z_2, \dots, Z_k), \quad (2)$$

где Z_1, Z_2, Z_k - влияющие факторы.

Свободные концы термопары находятся при постоянной и известной температуре T_0 , и ε_0 практически не изменяется в процессе работы термопары. С учетом поведения ε_1 и ε_0 во времени выражение (1) можно представить в виде

$$E_1 = \varepsilon_1 T_x - E_0, \quad (3)$$

где $E_0 = \varepsilon_0 T_0$ - термо-ЭДС свободных концов, которая является постоянной величиной для выбранного типа термопары.

Милливольтметром 5 производят ряд измерений термо-ЭДС рабочего конца и определяют ее среднеарифметическое значение

$$\bar{E}_1 = \left(\sum_{i=1}^n E_i \right) / n, \quad (4)$$

где n - количество измерений.

По значению \bar{E}_1 , определяют случайные отклонения в результатах измерений $\Delta E_1 = E_1 - \bar{E}_1$, и вычисляют среднеквадратичное отклонение (СКО) ряда измерений

$$G = \sqrt{\sum_{i=1}^n \Delta E_1^2 / n} \quad (5)$$

Значение СКО принимают за порог чувствительности термопары измерения температуры по напряжению.

Затем переключатель 4 переводят в верхнее положение, и подключают термоэлектроды термопары через амперметр 6 к регулируемому источнику тока 7. Дополнительно нагревают рабочий конец термопары 1, пропуская по термоэлектродам через него постоянный ток. При соответствующей полярности тока через рабочий конец выделяется теплота Пельтье, вызывающая постоянное повышение температуры спая, а, следовательно, и его термо-ЭДС

$$E_2 = \varepsilon_2 (T_x + \Delta T) - E_0 \quad (6)$$

где ε_2 - коэффициент Зеебека при температуре рабочего конца $T_x + \Delta T$.
Дополнительный нагрев рабочего конца производят в течение времени

$$\Delta T = \frac{\pi \cdot I_0}{\hat{c} \cdot m} \Delta t \quad (7)$$

где m - тепловая постоянная времени термопары,

Процесс дополнительного нагрева рабочего конца в течение временного интервала, меньшего тепловой постоянной времени термопары, можно считать адиабатическим и линейным. Температура перегрева в этом случае определяется выражением

$$\Delta T = \frac{\pi \cdot I_0}{\hat{c} \cdot m} \Delta t \quad (8)$$

где π - коэффициент Пельтье;

I_0 - задаваемый по амперметру ток нагрева;

\hat{c} - усредненная удельная теплоемкость рабочего конца;

m - масса рабочего конца;

Δt - время нагрева.

Ток нагрева I_0 выбирают из условия превышения термо-ЭДС к концу времени нагрева Δt на 100-200 значений порога чувствительности термопары, выраженного в среднеквадратичном отклонении измеренной ранее термо-ЭДС \bar{E}_1 ,

$$E_2 - \bar{E}_1 \geq (100 \dots 200) \sigma \quad (9)$$

При номинальном распределении Случайных отклонений термо-ЭДС от среднего значения E_1 , максимальная случайная погрешность измерения E_2 при вероятности $p = 0,997$ не превысит σ более чем в 3 раза. Поэтому 100-200 кратное превышение приращения термо-ЭДС термопары от дополнительного нагрева рабочего конца относительно σ обеспечивает измерение E_2 с погрешностью не более чем 3σ . В то же время, новое значение термо-ЭДС E_2 находится в области пороговых отклонений относительно первоначального значения термо-ЭДС E_1 . Поэтому можно считать, что чувствительность термопары практически не изменилась ($\varepsilon_2 = \varepsilon_1$). Тогда термо-ЭДС (6) с учетом выражения (8) примет значение

$$E_2 = \varepsilon_1 (T_x + \frac{\pi I_0}{\hat{c} m} \Delta t) - E_0 \quad (10)$$

В момент окончания временного интервала Δt переключатель 4 вновь переводят в нижнее положение и осуществляют отсчет значения термо-ЭДС E_2 милливольтметром 5.

После проведения измерений вычитают из термо-ЭДС (10) усредненное значение термо-ЭДС (3) и получают разность

$$E_2 - \bar{E}_1 = \frac{\varepsilon_1 \pi I_0}{\hat{c} m} \Delta t \quad (11)$$

Коэффициент Пельтье зависит от температуры рабочего конца и, в соответствии с соотношением Кельвина, функционально связан с коэффициентом Зеебека

$$\pi = \varepsilon_1 T_x \quad (12)$$

Подставляя в выражение (11) значение коэффициента Пельтье (12), получаем

$$E_2 - \bar{E}_1 = \frac{\varepsilon_1^2 T_x I_0}{\hat{c} m} \Delta t \quad (13)$$

Значение ε_1 можно определить из уравнения

$$\varepsilon_1 = \frac{\bar{E}_1 + E_0}{T_x} \quad (14)$$

После подстановки(14) в выражение(13) имеем

$$E_2 - \bar{E}_1 = \frac{(\bar{E}_1 + E_o)^2 I_o \Delta t}{\hat{C} m T_x}, \quad (15)$$

откуда абсолютная температура рабочего конца

$$T_x = \frac{(\bar{E}_1 + E_o)^2 I_o \Delta t}{(E_2 - \bar{E}_1) \hat{C} m}. \quad (16)$$

В полученное выражение (16) входят измеряемые величины \bar{E}_1 , E_2 , I_o , Δt , а также постоянные величины, определяемые материалом и конструкцией термопары (E_o , \hat{C} , m). Поэтому формула (16) позволяет вычислить абсолютную температуру рабочего конца, а, следовательно, и температуру контролируемой среды, независимо от фактических значений коэффициентов Зеебека и Пельтье, т.е. действительной чувствительности термопары к температуре.

Теплоемкость рабочего конца термопары $C = \hat{C} m$ также определяют из известной температуры среды, куда помещают рабочий конец. Если устанавливаемая температура рабочего конца T_o^I , то теплоемкость термопары, вычисленная по формуле (16), определяется выражением

$$C = \frac{(\bar{E}_1 + E_o)^2 I_o \Delta t^I}{(E_2^I - \bar{E}_1^I) T_o^I}, \quad (17)$$

где \bar{E}_1^I , E_2^I , I_o^I и Δt^I - величины, измеренные при определении известной температуры T_o^I .

Термо-ЭДС свободных концов термопары $E_{ск}$ также определяют по двум значениям известной температуры среды T_o^I и T_o^II . Вначале рабочий конец термопары помещают в среду с температурой T_o^I и определяют по формуле (17) его теплоемкость C .

Затем температуру среды изменяют до второго известного значения T_o^II . В соответствии с выражением (16) имеем

$$T_o^{II} = \frac{(\bar{E}_1^{II} + E_o)^2 I_o^{II} \Delta t}{(E_2^{II} - \bar{E}_1^{II}) C} \quad (18)$$

или с учетом выражения (17) получаем

$$T_o^{II} = \left(\frac{\bar{E}_1^{II} + E_o}{\bar{E}_1^I + E_o} \right)^2 \left(\frac{E_2^I - \bar{E}_1^I}{E_2^{II} - \bar{E}_1^{II}} \right) \frac{I_o^{II} \Delta t}{I_o^I \Delta t^I} T_o^I, \quad (19)$$

где \bar{E}_1^{II} , E_2^{II} , I_o^{II} и Δt^{II} - величины, измеренные при определении известной температуры T_o^{II} .

Если выполнить условие $I_o^I = I_o^{II}$ и $\Delta t^I = \Delta t^{II}$, то получим

$$T_o^{II} = \left(\frac{\bar{E}_1^{II} + E_o}{\bar{E}_1^I + E_o} \right)^2 \left(\frac{E_2^I - \bar{E}_1^I}{E_2^{II} - \bar{E}_1^{II}} \right) T_o^I. \quad (20)$$

Из выражения (20) следует, что отношение термо-ЭДС

$$\begin{aligned} \frac{\bar{E}_1^{II} + E_o}{\bar{E}_1^I + E_o} &= \\ &= \sqrt{\frac{T_o^{II}}{T_o^I} \left(\frac{E_2^{II} - \bar{E}_1^{II}}{E_2^I - \bar{E}_1^I} \right)} = R, \quad (21) \end{aligned}$$

где R - вычисляемый коэффициент.

Решая уравнение (21) относительно E_o , получаем

$$E_o = \frac{R \bar{E}_1^I - \bar{E}_1^{II}}{1 - R}. \quad (22)$$

Определяемые в процессе калибровки термопары её параметры и E_o в дальнейшем используются для расчета абсолютной температуры T_x контролируемой среды по измеренным значениям \bar{E}_1 , E_2 , I_o , Δt в соответствии с формулой (16).

Для проверки предложенного способа проверялась серийная термопара градуировки ХА, проработавшая в рабочей зоне водородной печи в течение 100 часов при температуре $\{573 \pm 30\}$ К. После указанного срока эксплуатации температура печи была установлена равной 573 К по термо-ЭДС образцовой температуры градуировки ГТП-1. Термо-ЭДС поверяемой термопары, свободные концы которой помещены в термостат с $T_o = 323$ К, составила $\bar{E}_1 = 9,693$ мВ при среднеквадратичном отклонении измеряемой ЭДС $\sigma = 4 \cdot 10^{-3}$ мВ, что, в соответствии с градуировочной характеристикой термопары, соответствует 561,2 К. Таким образом, погрешность проработавшей термопары составила 11,8 К.

По предлагаемому способу после определения среднего значения термо-ЭДС \bar{E}_1 через рабочий конец термопары пропустили постоянный ток $I_0 = 1,5$ А в течение $\Delta t = 5$ с. Измеренное значение термо-ЭДС в конце указанного интервала составило $E_2 = 10,943$ мВ, что свидетельствует о перегреве рабочего конца относительно температуры окружающей среды примерно на 25 К. Теплоемкость и термо-ЭДС свободных концов, вычисленных по двум значениям калибровочной температуры, составили для указанного типа термопары:

$$C = 2,732 \cdot 10^{-3} \text{ Вт с/К}, \quad E = 6,457 \text{ мВ}.$$

Абсолютная температура рабочего конца термопары, вычисленная по формуле (16), составила:

$$T_x = \frac{(\bar{E}_1 + E_0)^2 I_0 \Delta t}{(E_2 - \bar{E}_1) C} =$$

$$= \frac{(9,693 + 6,457)^2 \cdot 10^{-6} \cdot 1,5 \cdot 5}{(10,943 - 9,693) \cdot 10^{-3} \cdot 2,732 \cdot 10^{-3}} =$$

$$= 572,7 \text{ К}$$

Таким образом, отличие определенной по предлагаемому способу температуры агрессивной среды с помощью термопары, чувствительность которой в процессе эксплуатации неконтролируемо изменялась, по сравнению с образцовой термопарой составило всего 0,3 К. Это позволяет продлить срок эксплуатации термопары на значительное время, вплоть до ее начала разрушения, когда начинают изменяться ее геометрические размеры. Ориентировочно этот способ позволяет повысить надежность и увеличить срок эксплуатации термопар в 3-5 раз при сохранении заданной точности (погрешность измерения не более 0,5 К).

