

## Падение электрического сопротивления изоляции термопар типа N в металлической оболочке при температурах выше 800 °C

М. У. ХАСТИНГС, ДЖ. В. ПИАРС, Г. МАЧИН

Национальная физическая лаборатория, Теддингтон, Великобритания,  
e-mail: jonathan.pearce@npl.co.uk

Приведены результаты исследования уменьшения электрического сопротивления изоляции двух термопар типа N диаметрами 1,5 и 3 мм, вложенных в металлический чехол с неорганической изоляцией, в диапазоне температур 850—1100 °C.

**Ключевые слова:** термопара, электрическое сопротивление изоляции.

The result of study of drop of insulation electrical resistance of two type N thermocouples with diameters 1,5 and 3 mm placed in metal case with inorganic insulation at temperatures 850—1100 °C are presented.

**Key words:** thermocouple, insulation electrical resistance.

Термопары — устройства, которые хорошо подходят для измерения высокой температуры, но при температуре ниже приблизительно 600 °C их часто заменяют платиновыми термопреобразователями сопротивления из-за превосходящих точности и воспроизводимости последних. Термопара состоит из двух термоэлектродов разнородных металлов, соединенных на одном конце в измерительный спай, который погружают в горячую среду, а другие два конца находятся при известной постоянной температуре. Электродвижущую силу (ЭДС) Зеебека, возникающую из-за температурного градиента, измеряют между свободными концами; она будет соответствовать отсчету температуры. Термопары типа N широко используются в промышленности и постепенно становятся доминирующими по сравнению с термопарами типа K в диапазоне температур от –270 до 1300 °C. В термопарах типа N положительный термоэлектрод представляет собой соединение нихросил (никель-хром-кремниевый сплав) и отрицательный термоэлектрод — нисил (никель-кремний-магниевый сплав); в термопарах типа K положительный термоэлектрод — сплав никель-хром и отрицательный — сплав никель-алюминий. Термопары типа N имеют преимущество, поскольку используемые в них соединения более стойкие к окислению и кристаллографическим изменениям и, следовательно, менее подвержены дрейфу [1—3]. Для большей степени защиты электроды термопары обычно вставляют в металлический чехол с неорганической изоляцией (МЧНИ) преимущественно в виде порошка MgO (или Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> для температуры выше примерно 1100 °C).

Иногда пользователи термопар в промышленности прикладывают напряжение смещения между термоэлектродами и чехлом, как показано на рис. 1, чтобы предотвратить или подавить движение ионов металла к термоэлектродам и, следовательно, поддержать чистоту термоэлектродов и качество термопары [4]. Однако эта практика спорна, поскольку известно и было показано в [5, 6] для высокотемпературных платиновых термопреобразователей сопротивления, что при высоких температурах и в термопарах происхо-

дит утечка по изоляции. Этот эффект требует тщательного рассмотрения на огнеупорных термопарах, например, вольфрам-рениевого типа [7]. Цель настоящего исследования — описать эффект утечки при приложении напряжения смещения и, таким образом, непосредственно проверить, становится ли изоляция проводящей. В таком случае подача напряжения смещения нецелесообразна, так как из-за ухудшения изоляции усугубляются многие погрешности.

Схема экспериментальной установки показана на рис. 2. Для получения необходимой высокой температуры использовали печь типа TSV 18/15/100 фирмы Elite Thermal Systems Ltd. Ее максимальная температура 1800 °C, длина горячей зоны 100 мм. Рабочая труба выполнена из Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и имеет внутренний диаметр 15 мм. Применяли две термопары типа N фирмы TC Ltd. с изоляцией из MgO и чехлами из нержавеющей стали диаметрами 1,5 и 3 мм. Использование чехлов разных диаметров позволяет исследовать влияние различной толщины изоляции. Глубина погружения термопар в рабочую трубу 240 мм. Устанавливали шесть значений температуры в диапазоне 850 — 1100 °C с шагом 50 °C. Напряжение смещения задавали и изменяли при помощи источника питания модели PL310QMD фирмы Thurlby Thandar. Его клеммы соединяли медными проводами, изолированными поливинилхлоридом, с чехлом термопары и одним из термоэлектродов, что создавало электрическую цепь с изоляцией MgO, представляющей основную нагрузку, тогда как термоэлектроды, медные провода и эталонный резистор в плече сравнения имеют незначительные сопротивления.

При каждой температуре появляющуюся на термопаре ЭДС измеряли нановольтметром Keithley 2182A, а силу тока смещения в цепи находили по падению напряжения, измеренному цифровым мультиметром Keithley 195A на эталонном резисторе сопротивлением 1 Ом. По результатам этих измерений вычисляли сопротивление изоляции. Свободные концы термопары были удлинены медными проводами в тонких кварцевых трубках, которые погружали в смесь воды

со льдом в сосуде Дьюара и поддерживали при 0 °С. Программа, регистрирующая данные, записывала ЭДС термопары, а силу тока фиксировали вручную.

Различие между ЭДС термопары с приложенным напряжением смещения  $U_{см}$  и без него назовем «погрешность изоляции». Чтобы исследовать влияние  $U_{см}$ , на термопару подавали ряд напряжений в пределах  $\pm 20$  В. Положительное напряжение вызывало положительную погрешность изоляции (увеличение ЭДС), а отрицательное — отрицательную (уменьшение ЭДС).

При каждой температуре к каждой термопаре прикладывали  $U_{см}$ , начиная с +20 В, и давали отсчету стабилизироваться. Напряжение смещения уменьшали через интервал 2 В до нуля. Затем подводящие провода переключали, при этом  $U_{см}$  изменялось на -20 В. После того, как сигнал термопары становился стабильным, напряжение изменяли через интервал 2 В до нуля. Результаты записывали, когда исчезало изменение регистрируемого сигнала, т. е. когда происходила стабилизация. Эта процедура была выполнена для обеих термопар при шести температурах: 850, 900, 950, 1000, 1050 и 1100 °С.

Каждое новое значение  $U_{см}$  прикладывали в течение, по крайней мере, 2 мин. Если оказывалось, что сигнал термопары был устойчив, измерение считалось выполненным, и подавали следующее значение  $U_{см}$ . В течение этих 2 мин три раза снимали по три последовательных отсчета. Для сигнала при отсутствии  $U_{см}$  вычисляли среднее из трех серий данных: в начале и конце эксперимента, между приложением положительных и отрицательных значений  $U_{см}$ . После того, как были рассчитаны средние значения результатов, для преобразования ЭДС в температуру использовали номинальную статическую характеристику термопары типа N [8]. Вычисляли отклонение отсчитываемой температуры от температуры при нулевом смещении (т. е. погрешность изоляции), а сопротивление цепи утечки определяли по закону Ома, поскольку напряжение и сила тока были известны.

На рис. 3, 4 показано, как сдвиг температуры  $\Delta T$ , обусловленный погрешностью изоляции, меняется в зависимости от  $U_{см}$  для термопар диаметрами 3 и 1,5 мм при разных температурах печи  $T_n$ . На рис. 5 продемонстрировано изменение сопротивления изоляции для этих двух термопар при изменении температуры печи.

Как следует из рис. 3, а—г, с ростом  $U_{см}$  при данной температуре печи погрешность изоляции увеличивается, причем значительно больше для тонкой термопары. Эти зависимости можно считать приблизительно линейными, лишь в кривой на рис. 3, а проявляется измерительный шум, превышающий погрешность изоляции. Причина отклонения от неизменного сигнала состоит в том, что, когда температура увеличивается, сопротивление изоляции экспоненциально уменьшается, как следует из рис. 5. Нарушения неорганической изоляции объясняются тем, что ее электроны при высокой температуре переходят в зону проводимости, таким образом создавая проводящую среду.

Сдвиг температуры  $\Delta T$  при  $T_n \leq 850$  °С практически отсутствует независимо от поданного  $U_{см}$  (см. рис. 4).

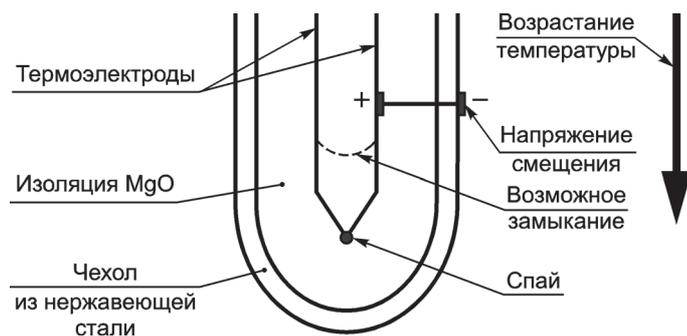


Рис. 1. Поперечное сечение термопары. Пунктиром показано размытие локализации измерительного спая, когда изоляция становится проводящей

Однако с ростом  $T_n$  он существенно увеличивается, особенно для термопар меньшего диаметра. Форма кривых на рис. 4, б хорошо описывается полиномом третьей степени.

Первоначально было отмечено, что, когда  $U_{см} = +20$  В, стабилизация отсчета требовала некоторого времени. Приблизительно через полчаса сила тока и ЭДС термопары увеличивались или уменьшались, приходя к устойчивым значениям. Такую временную зависимость трудно объяснить, но, возможно, в этом участвуют поляризация или емкостные эффекты. Из рис. 6 следует, что сопротивление изоляции зависит от полярности  $U_{см}$ .

Теперь рассмотрим простую модель оценки возможного влияния этого явления на погрешность измерения термо-

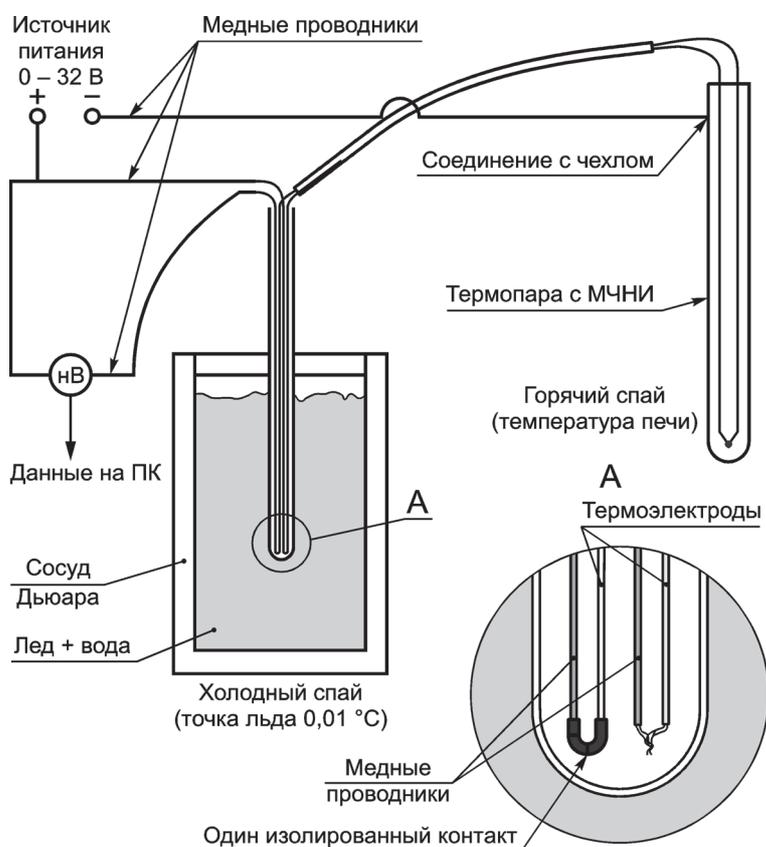


Рис. 2. Экспериментальная установка: ПК — персональный компьютер; МЧНИ — металлический чехол с неорганической изоляцией

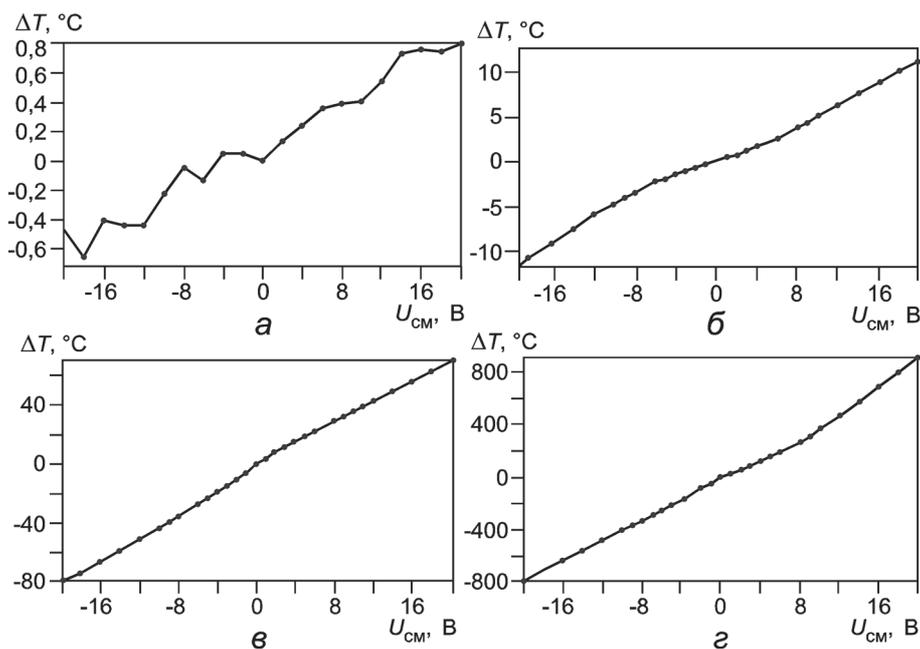


Рис. 3. Зависимости сдвига температуры  $\Delta T$ , обусловленного погрешностью изоляции, от  $U_{см}$  для термопар диаметрами 3 мм (а, в) и 1,5 мм (б, г) при температурах печи 850 °С (а, б) и 1100 °С (в, г)

пары. Когда термопара помещена в печь, наблюдается температурный градиент вдоль проводов, который вызывает разность потенциалов между ними. Если известны зависимости тока утечки от  $U_{см}$ , то можно оценить погрешность изоляции термопары и даже предсказать поправку к ее ЭДС.

Это возможно аппроксимацией полиномиальной функцией зависимости погрешности изоляции от температуры печи  $T_p$  для данного напряжения  $U_{см}$  (с целью экстраполяции к максимальной температуре термопары типа N в диапазоне 1100 — 1300 °С) и последующим линейным масштабированием погрешности изоляции (в предположении линейной зависимости от  $U_{см}$ ) к тому значению ЭДС термопары типа N, какое было бы при той же  $T_p$ . Другими словами, изменение  $U_{см}$  в пределах  $\pm 20$  В дает погрешность изоляции порядка десятков градусов, тогда как поправка к ЭДС

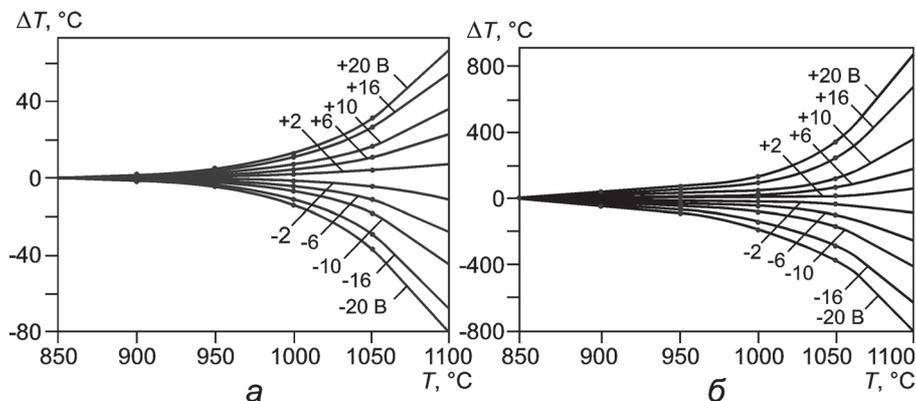


Рис. 4. Зависимости сдвига температуры  $\Delta T$  в функции от температуры печи  $T_p$  для термопар диаметрами 3 мм (а) и 1,5 мм (б) при выбранных напряжениях смещения

термопары при  $T_p > 850$  °С составляет около 20 мВ. Можно ожидать и пропорционального уменьшения погрешности изоляции.

Предполагаемые неопределенности результатов измерений температуры из-за утечек через изоляцию термопар разных диаметров приведены на рис. 7. Для термопар диаметром 3 мм предсказанное влияние утечек весьма незначительно (менее 1,2 °С). Отметим, что полученные результаты вполне согласуются с данными из [9]: для термопар диаметрами 3 и 6 мм утечка изоляции при 1100 °С привела к погрешности около 20 мкВ (0,53 °С). В то же время для термопары диаметром 1,5 мм она может достигать десятков градусов (см. рис. 7, б). Это же отмечается в рекомендациях изготовителей и в [10].

**Заключение.** Потенциальная погрешность, связанная с утечкой изоляции термопары, может быть довольно большой, если толщина электрической изоляции недостаточна. Изготовители термопар типа N и пользователи должны знать об этом факте и выбирать изоляцию возможно большей толщины. Кроме того, результаты этого

исследования показывают, что нецелесообразно прикладывать напряжение смещения к термопаре. Хотя эта практика в настоящее время не имеет широкого распространения интерес к ней растет как к средству снижения влияния примесей в термопаре при более высоких температурах. Однако в наихудшем случае использование напряжения смещения может вызвать погрешности в десятки градусов. В дальнейшем предполагается изучить разные виды изоляции и влияние ее толщины для различных типов термопар. Например, должна быть исследована изоляция из окисей алюминия и гафния высокотемпературных термопар, таких как платиновые (типов R, S и В) и вольфрам-ренийевые (например, типов С и D). Чтобы подкрепить сделанные выше выводы, предполагается повторить эксперименты с термопарами типа N диаметром 3 мм при температурах до 1300 °С.

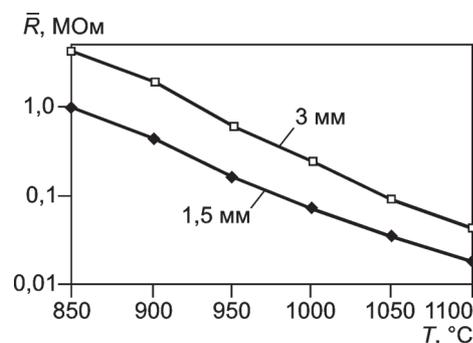


Рис. 5. Зависимости среднего сопротивления изоляции  $\bar{R}$  от температуры печи  $T_p$  для термопар диаметрами 3 и 1,5 мм

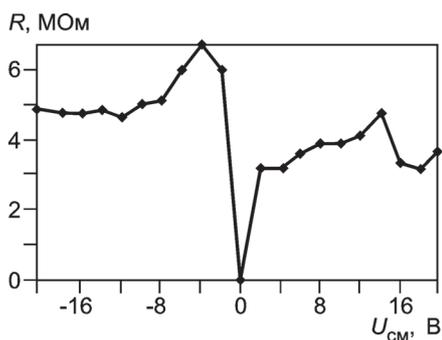


Рис. 6. Зависимость сопротивления изоляции  $R$  от  $U_{CM}$  при  $T_n = 850$  °С для термопары диаметром 3 мм

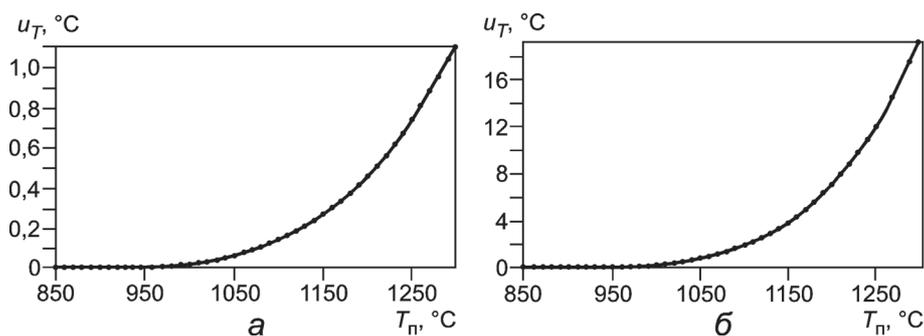


Рис. 7. Предполагаемые неопределенности результатов измерения температуры  $u_T$  из-за утечки через изоляцию термопар диаметрами 3 мм (а) и 1,5 мм (б). Участки кривых от 1100 до 1300 °С экстраполированы

## Литература

1. **Bentley R. E.** Handbook of Temperature Measurement. V. 3: The Theory and Practice of Thermoelectric Thermometry. N.Y.: Springer, 1988.
2. **Rusby R. e. a.** An evaluation of sheathed Nicrosil/Nisil thermocouples up to 1300 °C // Materials at High Temperatures. 1992. V. 10. P. 193—200.
3. **Burley N.** Advanced integrally-sheathed type N thermocouple of ultra-high thermoelectric stability // Proc. Austral. Instrum. & Meas. Conf. Adelaide: Institution Engineers Austral., Nov. 1989. P. 90—95.
4. **Tavener J.** Private communication, 2010.
5. **Berry R. J.** Analysis and control of electrical insulation leakage in platinum resistance thermometers up to 1064 °C // Metrologia. 1995. V. 32. P. 11—25.

6. **Berry R. J.** Ac and Dc insulation leakage in platinum resistance thermometers up to 750 °C // Metrologia. 1985. V. 21. P. 207—223.
7. **Morice R., Ridoux P., Filtz J. R.** Improved measurements in contact thermometry at high temperature through practical fixed points // Measure. 2008. V. 3. P. 44—49.
8. **BS EN (IEC) 60584 -1:1996:** Thermocouples — Reference tables. See also: ASTM E 230 and NIST Monograph 175, 1993.
9. **Bentley R. E., Morgan T. L.** Ni-based thermocouples in the mineral-insulated metal-sheathed format: thermoelectric instabilities to 1100 °C // J. Phys. E: Sci. Instrum. 1986. V. 19. P. 262—268.
10. **ASTM 608.** Standard Specification for Mineral-Insulated Metal-Sheathed Base Metal Thermocouples, 2000.

Дата принятия 09.02.2012 г.

**ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ**

681.58

**Контактные модуляторы тока с выходом на удвоенной частоте****Ю. В. АФАНАСЬЕВ, А. Ю. АФАНАСЬЕВ**

Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии им. Д. И. Менделеева, С.-Петербург, Россия, e-mail: mag-sensors@mail.ru

Показано, что преимущество контактных модуляторов с выходом на удвоенной частоте — значительно более низкие смещение и дрейф нуля (временной и температурный) — открывает реальную возможность освоения не только нановольтового, но и пиковольтового диапазонов усиливаемых напряжений. Рассмотрены две схемы построения таких модуляторов. Описан высокочувствительный усилитель типа модулятор-демодулятор с модуляцией на удвоенной частоте, указаны области его применения.

**Ключевые слова:** контактный модулятор, усиление слабых постоянных или медленно меняющихся сигналов.

An advantage of contact modulators with an output on the doubled frequency consists in significantly lower values of offset and zero drift (time- and temperature dependent). The real possibility of mastering not only nanovolt range, but also picovolt range of amplified voltages opens. Two possible schemes for development of such modulators have considered. Highly sensitive MDM-amplifier with modulation on the doubled frequency is described, and fields of its application is specified.

**Key words:** contact modulator, amplification of weak DC or slowly changing signals.

В прикладной науке и технике нередко возникает необходимость усиления слабых постоянных и инфранизкочастотных электрических токов и напряжений. Для этой цели,

как правило, используют усилители типа МДМ (модулятор-демодулятор). В них спектр входного сигнала переносится в область более высоких частот, где затем применяют опера-