

# Physikalisch- Technische Bundesanstalt



**DKD**

---

**Методическая  
инструкция  
DKD-R 5-1**


**Калибровка  
термометров  
сопротивления**

---

Выпуск 08/2019

<https://doi.org/10.7795/550.20180828ACRU>



	Калибровка термометров сопротивления <a href="https://doi.org/10.7795/550.20180828ACRU">https://doi.org/10.7795/550.20180828ACRU</a>	DKD-R 5-1	
		Выпуск:	08/2019
		Редакция:	0
		Страница:	2 / 28

## Немецкая служба калибровки – Deutscher Kalibrierdienst (DKD)

Со дня основания в 1977 году Немецкая служба калибровки DKD объединяет калибровочные лаборатории промышленных предприятий, научно-исследовательских институтов, технических учреждений и контрольно-испытательных организаций. 3 мая 2011 года DKD была создана заново как *технический орган* PTB и аккредитованных лабораторий.

Этот орган носит название "*Немецкая служба калибровки*" (*Deutscher Kalibrierdienst, DKD*) и осуществляет свою деятельность под руководством PTB. Методические инструкции и рекомендации, разработанные DKD, отражают актуальный уровень технического развития в соответствующей области и предоставляются Немецкому органу по аккредитации (DAkkS – Deutsche Akkreditierungsstelle GmbH) для проведения аккредитации калибровочных лабораторий.


DAkkS как правопреемник DKD аккредитует и контролирует аккредитованные калибровочные лаборатории, которые осуществляют калибровку средств измерений и мер для установленных при аккредитации величин и диапазонов измерения. Выдаваемые ими сертификаты калибровки являются подтверждением прослеживаемости к национальным эталонам, которое требуется согласно стандартам серии DIN EN ISO 9000 и DIN EN ISO/IEC 17025.

### Контакт:

Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB)  
DKD-Geschäftsstelle  
Bundesallee 100                      38116 Braunschweig

Абонентский ящик  
Postfach 33 45                      38023 Braunschweig  
Телефон секретариата:            +49 531 592-8021  
Интернет:                              www.dkd.eu

перевод с немецкого языка

	Калибровка термометров сопротивления <a href="https://doi.org/10.7795/550.20180828ACRU">https://doi.org/10.7795/550.20180828ACRU</a>	DKD-R 5-1	
		Выпуск:	08/2019
		Редакция:	0
		Страница:	3 / 28

*Рекомендация для цитирования при указании источника:*

*Методическая инструкция DKD-R 5-1 Калибровка термометров сопротивления, выпуск 08/2019, редакция 0, Национальный метрологический институт Германии, Брауншвейг и Берлин*

*DOI: <https://doi.org/10.7795/550.20180828ACRU>*

*(Richtlinie DKD-R 5-1, Kalibrierung von Widerstandsthermometern, Ausgabe 09/2018, Revision 0, Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Braunschweig und Berlin.*

*DOI: <https://doi.org/10.7795/550.20180828AC>*

Документ, включая все его части, защищён авторскими правами и подлежит пользовательской лицензии Creative Commons CC by-nc-nd 3.0 (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/de/>). В этой связи „некоммерческое использование“ (NC) обозначает, что этот документ запрещено распространять в целях извлечения прибыли, или же делать его достоянием общественности. Разрешается и рекомендуется использовать документ в целях промышленного применения в лабораториях.




Авторы:

Члены Технического комитета DKD *Температура и влажность* в период с 2002 г. по 2009 г.

Выпущена Национальным метрологическим институтом Германии (PTB) для Немецкой службы калибровки (DKD) и является результатом совместной работы PTB и Технического комитета DKD *Температура и влажность*.

## Содержание

Содержание .....	4
Предисловие.....	5
1 Область применения.....	5
2 Введение.....	6
3 Термометры сопротивления .....	6
3.1 Металлические термометры сопротивления .....	6
3.1.1 Эталонные платиновые термометры сопротивления (SPRT).....	6
3.1.2 Промышленные платиновые термометры сопротивления (IPRT).....	7
3.2 Полупроводниковые термометры сопротивления .....	7
4 Основы калибровки термометров сопротивления .....	7
5 Транспортирование и первоначальный осмотр.....	8
6 Испытание на старение.....	8
7 Терморегулирующее устройство .....	9
8 Влияющие факторы .....	10
8.1 Тепловая нагрузка .....	10
8.2 Тепловая связь.....	10
8.3 Электрические способы измерений.....	10
8.4 Схемы соединений .....	11
8.4.1 Двухпроводная схема .....	11
8.4.2 Трёхпроводная схема .....	11
8.4.3 Четырёхпроводная схема.....	12
8.4.4 Паразитная термоэлектродвижущая сила .....	12
8.4.5 Самонагрев .....	13
8.4.6 Сопротивление изоляции .....	13
8.4.7 Несимметричное отклонение .....	13
8.4.8 Гистерезис.....	13
9 Рекалибровка.....	13
10 Результаты .....	15
Приложение А: Неопределённость измерений при калибровке термометров методом сравнения .....	16
Приложение В: Неопределённость измерений при измерениях термометром сопротивления .....	27

	Калибровка термометров сопротивления <a href="https://doi.org/10.7795/550.20180828ACRU">https://doi.org/10.7795/550.20180828ACRU</a>	DKD-R 5-1	
		Выпуск:	08/2019
		Редакция:	0
		Страница:	5 / 28

## Предисловие

Методические инструкции DKD – это прикладные документы к требованиям стандарта DIN EN ISO/IEC 17025. В методических инструкциях описываются технические, технологические и организационные процессы, которые служат образцом для определения внутренних процедур и регламентов в аккредитованных калибровочных лабораториях. Методические инструкции DKD могут быть включены в руководства по менеджменту качества калибровочных лабораторий. Имплементация методических инструкций способствует унификации при обращении с калибруемыми приборами в различных калибровочных лабораториях и повышает стабильность и контролируемость работы калибровочных лабораторий.

Методические инструкции DKD не должны тормозить дальнейшее развитие методов и процессов калибровки. По согласованию с органом аккредитации допускаются отклонения от методических инструкций и внедрение новых процедур, если на это есть технически обоснованные причины.

Настоящая методическая инструкция была разработана уже в 2003 г. Техническим комитетом *Температура и влажность* в сотрудничестве с РТВ и аккредитованными калибровочными лабораториями.

Настоящее переработанное переиздание содержит только обновлённые выходные данные.

Настоящее издание идентично по содержанию методической инструкции DAkkS-DKD-R 5-1 (издание 2010 г.). Методическая инструкция DAkkS-DKD-R 5-1 будет изъята из обращения Немецким органом по аккредитации DAkkS не позднее 01.01.2021 года.

Выпуск: 10/2003 г., опубликован Немецкой службой калибровки DKD

1. Переиздание: 2010 г., переработано Немецким органом по аккредитации DAkkS
2. Переиздание: 2018 г., переработано Немецкой службой калибровки DKD, идентично по содержанию 1-му переизданию

## 1 Область применения


Настоящая методическая инструкция была разработана с целью удовлетворить потребность в справочнике в виде рамочного документа, рассматривающего калибровку термометров сопротивления. В первую очередь она распространяется на платиновые термометры сопротивления, которые соответствуют требованиям стандарта DIN EN 60751 и измеряют температуры в диапазоне от -200 °C до 850 °C.

Кроме того, она распространяется также и на другие виды термометров сопротивления; как особо важные следует здесь назвать следующие:

- термометры сопротивления из спектрально чистого платина, соответствующие требованиям МТШ-90 (температурный диапазон от -259 °C до 962 °C)
- никелевые термометры сопротивления
- медные термометры сопротивления
- полупроводниковые термометры сопротивления (термисторы, NTC, PTC)

Кроме этого, настоящая методическая инструкция применима к

- электрическим прямопоказывающим термометрам с датчиком сопротивления
- термометрам сопротивления с измерительным преобразователем, где в качестве выходного сигнала измерительного преобразователя возможны как аналоговые, так и цифровые унифицированные сигналы

	Калибровка термометров сопротивления <a href="https://doi.org/10.7795/550.20180828ACRU">https://doi.org/10.7795/550.20180828ACRU</a>	DKD-R 5-1	
		Выпуск:	08/2019
		Редакция:	0
		Страница:	6 / 28

- регистрирующему устройству с электрическим термометром сопротивления в качестве датчика

## 2 Введение

Почти все применяемые на практике термометры относятся или к группе оптических пирометров, или к группе контактных термометров. Принцип действия контактных термометров основан на том, что посредством термического контакта датчик доводят до температуры объекта измерения; далее температура датчика определяется посредством измерения другой величины (расширения, электрического сопротивления и т.д.), показывающей зависимость от температуры. На практике наибольшая погрешность при измерении температуры возникает часто вследствие того, что температура датчика не идентична температуре объекта измерения. Контактный термометр измеряет, главным образом, „только“ свою собственную температуру. В этом смысле под калибровкой контактного термометра понимают метрологическое определение связи между температурой датчика и выходной величиной термометра. Пользователь должен обеспечить, чтобы температура датчика соответствовала измеряемой температуре. Неопределённости измерений вследствие недостаточной термической связи у пользователя не включены в неопределённость измерений калибровки термометра.

## 3 Термометры сопротивления

Принцип действия термометров сопротивления основан на зависимости электрического сопротивления металлических проводников и полупроводников от температуры. Таким образом измерение температуры сводится к измерению электрического сопротивления. На практике (не принимая во внимание диапазон низких температур с  $t < -200$  °C) применяются преимущественно следующие материалы в качестве датчиков сопротивления:


### 3.1 Металлические термометры сопротивления

Физическое свойство металлов заключается в том, что свободно движущиеся электроны выступают в качестве проводников электрического тока. Движению электронов препятствуют удары с так называемыми фононами, квантами теплового колебания, и рассеивание на фононах. Ввиду того, что число фононов при повышении температуры увеличивается, с температурой увеличивается и удельное сопротивление металлов.

Среди металлов на сегодняшний день в качестве материала для термометров сопротивления используется почти исключительно платина. При этом выделяют следующие типы:

#### 3.1.1 Эталонные платиновые термометры сопротивления (SPRT)

Сокращение SPRT для английского обозначения Standard-Platinum Resistance Thermometer употребляется также в немецком языке. Термометры состоят из спектрально чистой платиновой проволоки, намотанной без механического напряжения. Эти термометры отличаются электрическим свойством, заключающемся в наличии особенно большого температурного коэффициента, выраженного в требовании МТШ-90 как  $R(29,7646 \text{ °C}) / R(0,01 \text{ °C}) \geq 1,118 07$ . Это требование приблизительно равнозначно требованию  $R(100 \text{ °C}) / R(0 \text{ °C}) \geq 1,392$ . Поэтому в (устаревшем) лабораторном жаргоне такие термометры иногда называются также термометрами 392. В принципе эталонные платиновые термометры сопротивления SPRT позволяют осуществлять самые точные измерения температуры, так как по их характеристике в температурном диапазоне от 13,8

	Калибровка термометров сопротивления <a href="https://doi.org/10.7795/550.20180828ACRU">https://doi.org/10.7795/550.20180828ACRU</a>	DKD-R 5-1	
		Выпуск:	08/2019
		Редакция:	0
		Страница:	7 / 28

К до 962 °С определена международная температурная шкала МТШ-90. Данная характеристика обладает высокой воспроизводимостью уже благодаря использованию чистого металла без каких-либо компонентов сплава. Тем не менее на практике они применяются редко, так как они могут иметь только определённый тип конструкции и не являются очень стабильными при механических нагрузках.

### 3.1.2 Промышленные платиновые термометры сопротивления (IPRT)

Сокращение IPRT для английского обозначения Industrial Platinum Resistance Thermometer употребляется также в немецкоязычных странах. В данных термометрах в качестве материала датчика используется платина, содержащая в небольшом объёме другие компоненты сплава, но в таком составе, при котором соблюдается указанная в стандарте DIN EN 60751 характеристика. Температурный коэффициент термометров IPRT меньше, чем температурный коэффициент термометров SPRT; следующее требование имеет силу:  $R(100\text{ °C}) / R(0\text{ °C}) \cong 1,385$ , в связи с чем в лабораторном жаргоне такие термометры иногда называются термометрами 385. Термометры IPRT с разными типами конструкций датчиков получили широкое распространение. Особенно стабильными зарекомендовали себя проволочные датчики, тем не менее наибольшее всемирное распространение получили тонкоплёночные датчики. Самые известные термометры – термометры с сопротивлением 100 Ом при температуре 0 °С, также называемые сокращённо термометры Pt-100. Диапазон применения термометров IPRT находится между -200 °С и 600 °С.


Для определённых задач используются также никелевые и медные резисторы, применяемые однако только в ограниченном температурном диапазоне.

### 3.2 Полупроводниковые термометры сопротивления

Физическое свойство полупроводников заключается в том, что свободные электроны (и дыры) присутствуют только в небольшом объёме в качестве носителей заряда; они появляются в результате того, что из-за термического воздействия отдельные электроны переходят из полностью заполненной валентной зоны в пустую зону проводимости. Так как число электронно-дырочных пар при повышении температуры увеличивается, электрическое сопротивление соответственно уменьшается. Поэтому в этом случае говорят также о датчиках с отрицательным температурным коэффициентом (NTC = Negative Temperature Coefficient). С использованием определённых параметров могут быть также изготовлены датчики с положительным температурным коэффициентом (PTC датчики). На практике датчики NTC изготавливаются из комплексной смеси окислов металлов; их также ещё называют термисторами. Температурный коэффициент достигает от 3 % K<sup>-1</sup> до 5 % K<sup>-1</sup>, что значительно превышает температурный коэффициент металлов, и обеспечивает таким образом относительно простое устройство прямопоказывающих термометров, даже при ярко выраженной нелинейной характеристике.

## 4 Основы калибровки термометров сопротивления

Для калибровки термометр выставляют в подходящей среде на известную температуру и определяют исходный параметр (напр. электрическое сопротивление). В зависимости от вида термостатирования различают метод калибровки в реперных точках и метод сравнения: при методе реперных точек реализуется температура соответствующей реперной точки, при методе сравнения объект калибровки и эталонный термометр доводят в термостате до одинаковой, насколько это возможно, температуры и сравнивают показания между собой. Ампулы реперных точек и/или эталонные термометры должны быть откалиброваны и обладать прослеживаемостью. Для измерения объектом калибровки и/или эталонным термометром должны применяться подходящие

	Калибровка термометров сопротивления <a href="https://doi.org/10.7795/550.20180828ACRU">https://doi.org/10.7795/550.20180828ACRU</a>	DKD-R 5-1	
		Выпуск:	08/2019
		Редакция:	0
		Страница:	8 / 28

электрические средства измерений (омметр, мост для измерения сопротивлений, эталонные резисторы), которые также должны быть откалиброваны и обладать прослеживаемостью. Во многих случаях требования к условиям окружающей среды, особенно к температуре окружающей среды, установлены в спецификациях электрических приборов. Особенно критическим в данном случае является эталонный резистор, который часто поддерживают при постоянной температуре в отдельном термостате для измерений с малыми неопределённостями измерений. Для измерения температуры окружающей среды также необходим калиброванный термометр.

## 5 Транспортирование и первоначальный осмотр

Существуют различные модели термометров. Необходимо избегать удары и вибрации, так как они могут воздействовать (с различной силой в зависимости от модели) на структуру датчика и тем самым на его электрические свойства. Металлическая защитная трубка также не обеспечивает защиту от воздействий ударов на датчик. Тем не менее изменения могут быть выявлены относительно просто: с помощью измерения в тройной точке воды или точке таяния льда. Особенно критическим является транспортирование термометра. Обязательно необходима хорошая упаковка, напр. подходящие коробки с прокладкой из пенопласта. Несмотря на соответствующую маркировку, к сожалению, не всегда можно исходить из того, что коммерческие транспортные компании проявляют должную осмотрительность к упакованным товарам. Транспортирование особенно ценных объектов калибровки, напр. образцовых мер с малыми неопределённостями измерений, должно осуществляться при постоянном контроле сотрудника, напр. транспортирование вручную.

Первоначальный осмотр зависит как от запланированного применения термометра, так и от его конструкции. Сначала проверяют комплектность и целостность термометра. При обнаружении повреждений вследствие транспортирования или каких-либо других механических или электрических дефектов необходимо известить заказчика. Заказчик должен быть также проинформирован, если данные касательно объёма калибровки непонятны или неполны.

Термометры с подключёнными измерительными преобразователями или термометры с электрическими устройствами анализа данных должны иметь руководства по эксплуатации или технические паспорта.


Чёткая маркировка объекта калибровки необходима для обеспечения однозначной идентификации. Маркировка охватывает такие данные как серийный номер, обозначение типа, а также изготовителя. Как правило, нанесение калибровочного знака также обеспечивает возможность однозначной идентификации. Перед началом калибровки необходимо определить при комнатной температуре сопротивление изоляции. При этом необходимо соблюдать требования стандарта DIN EN 60751 (контрольное напряжение  $R_{iso}$ ). Необходимо следить за тем, чтобы ни датчик, ни последовательно подключённая электроника не были повреждены контрольным напряжением.

## 6 Испытание на старение

Механические напряжения, возникшие, напр., при транспортировании, можно частично снять отжигом (старение) при высоких температурах. Как правило для проверки стабильности термометров проводят испытание на старение при постоянном значении температуры (при номинальном значении температуры, в точке таяния льда, в тройной точке воды).

Как правило, сначала измеряется сопротивление термометра сопротивления в точке таяния льда. После этого термометрический чувствительный элемент нагревают в



	Калибровка термометров сопротивления <a href="https://doi.org/10.7795/550.20180828ACRU">https://doi.org/10.7795/550.20180828ACRU</a>	DKD-R 5-1	
		Выпуск:	08/2019
		Редакция:	0
		Страница:	9 / 28

течение надлежащего периода времени (приблизительно от 8 до 12 часов) до 10 К выше максимальной температуры калибровки; при этом следует учитывать, что максимальная рабочая температура, указанная производителем, не должна быть превышена. Затем сопротивление термометра измеряется снова при опорной температуре (в точке таяния льда). Если отклонение между двумя измерениями в точке таяния льда превышает 30 % от желаемой неопределённости измерений, тогда испытание на старение необходимо повторить. Если после повторного измерения опорное значение отклоняется от предшествующего измерения вновь более чем на 30 %, то данный объект калибровки возвращается как не поддающийся калибровке.

Если термометр калибруют повторно, и если изменение с момента последней калибровки не превышает 30 % от желаемой неопределённости измерений, то испытание на старение можно не проводить.

Исходное значение перед старением должно быть отдельно указано в сертификате калибровки.

## 7 Терморегулирующее устройство

Платиновые термометры сопротивления и полупроводниковые датчики калибруются методом сравнения или в определённых реперных точках применимой температурной шкалы. Комбинация обоих методов допускается. При методе сравнения калибруемые термометры сопротивления или полупроводниковые датчики сравниваются с образцовыми/ рабочими термометрами в банях с постоянно поддерживаемой температурой или в подходящих печах. Реперные точки и эталонные термометры должны обладать прослеживаемостью к национальным эталонам.

Для терморегулирующего устройства (термостатической бани, печи), используемого при калибровке, в рамках определения неопределённости измерений необходимо количественно оценить и учесть пространственное и временное распределение температуры в рабочем помещении.


Для определения временного и пространственного распределения калиброванные термометры одинаковой конструкции устанавливают на границах рабочей области (горизонтально, вертикально) терморегулирующего устройства. После термической стабилизации измеряемые термометрами температуры непрерывно регистрируются на протяжении определённого периода времени (более 20 мин.). Максимальная полученная разность температур между термометрами учитывается в качестве составляющей неопределённости измерений в бюджете неопределённости измерений (прямоугольное распределение).

Градиенты температуры в банях с постоянно поддерживаемой температурой или печах могут быть уменьшены за счёт установки металлического уравнивающего блока с просверлёнными отверстиями для установки эталонов и объектов калибровки.

При калибровке в заданных реперных точках применимой температурной шкалы подготовка ампул реперных точек должна осуществляться в соответствии с документом „Дополнительная информация к Международной температурной шкале 1990 г.“ („Supplementary Information for the International Temperature Scale of 1990“).

Калибровка термометра производится после установления теплового равновесия как терморегулирующего устройства, так и самого термометра.

Количество температур калибровки должно быть согласовано между заказчиком и калибровочной лабораторией. В случае определения характеристической кривой рекомендуется обратиться к методической инструкции „Определение характеристических кривых“ („Kennlinienbestimmung“ DKD-R 5-6).

	Калибровка термометров сопротивления <a href="https://doi.org/10.7795/550.20180828ACRU">https://doi.org/10.7795/550.20180828ACRU</a>	DKD-R 5-1	
		Выпуск:	08/2019
		Редакция:	0
		Страница:	10 / 28

## 8 Влияющие факторы

При калибровке термометра на неопределённость измерений оказывают влияние различные факторы. Наряду с неопределённостью измерений в реализации температуры существуют также влияющие факторы, исходящие от самого объекта калибровки, которые могут иметь неопределённость измерений во много раз превышающую неопределённость измерений реализации температуры (аккредитованную неопределённость измерений калибровочной лаборатории). Далее будут описаны влияющие факторы более подробно.

### 8.1 Тепловая нагрузка

Наряду с кратковременным старением (контроль в рамках первоначального осмотра, ср. главу 6) возникают также долговременные эффекты, размеры которых зависят от тепловой нагрузки во время эксплуатации. Оценка этой неопределённости измерений входит в обязанности пользователя термометра и определяется из значений повторной калибровки. Вклад от долговременной стабильности термометра не содержится в отчёте о неопределённости измерений в сертификате калибровки.

### 8.2 Тепловая связь

Ошибочные измерения, вызванные недостаточной глубиной погружения, являются причиной самых больших и чаще всего повторяющихся погрешностей измерений при калибровке термометров сопротивления! Кроме этого, необходимо учитывать, что используемые заказчиком погружные гильзы и защитные трубки, как правило, не применяются при калибровке. В таких случаях рекомендуется обратить внимание заказчика на ожидаемые погрешности измерений, которые могут возникнуть между измерениями в условиях проведения калибровки и в условиях проведения измерений.

Для соответствующего терморегулирующего устройства и калибруемого термометра при калибровке необходимо обеспечить максимально возможную глубину погружения или оптимальную тепловую связь. Необходимые меры должны быть указаны в сертификате калибровки. Таким образом должна быть обеспечена воспроизводимость результатов калибровки и их сравнимость в случае повторной калибровки. Этот порядок действий может вызвать условия проведения измерений, отличающихся от условий при последующем использовании. Пользователь должен рассчитать и соответственно учесть погрешности измерений, возникающие дополнительно.

Контроль глубины погружения для калибровки осуществляется путём сокращения максимально возможной глубины погружения на 10 %. Возникающая при этом погрешность от теплоотвода не должна превышать 10 % от желаемой неопределённости измерений, иначе необходимо увеличить неопределённость измерений, что, как правило, потребует нового более детального бюджета неопределённости измерений.

### 8.3 Электрические способы измерений

При измерении электрического сопротивления должны учитываться воздействия на результат измерений и при необходимости отображаться при оценивании неопределённости измерений. Измерение сопротивления осуществляется при неизменном переменном токе или (меняющемся) постоянном токе. Тип и выбор измерительных приборов зависит от желаемой неопределённости измерений при калибровке.

У термисторов может возникнуть эффект асимметрии, зависящий от направления тока через чувствительный элемент.

## 8.4 Схемы соединений

Ошибочные измерения могут быть также обусловлены сопротивлением подводящих проводов, которое следует отличать от сопротивления датчика. Для измерения электрического сопротивления используются три схемы подключения: двух-, трёх-, четырёхпроводная схема.

### 8.4.1 Двухпроводная схема

При двухпроводной схеме включения связь между чувствительным элементом и измерительным прибором осуществляется с помощью двухжильного провода. Как любой другой электрический проводник, он также обладает сопротивлением, которое подключается последовательно с чувствительным элементом. Таким образом сопротивления суммируются, что приводит к систематически более высокому показанию температуры. Это хотя и отображается на калибровочном значении, но при этом не учитывается то, что в процессе использования электрическое сопротивление подводящего провода также меняется вследствие внешнего влияния температуры. При наличии соединительного провода у калибруемого термометра пользователь должен учесть дополнительные погрешности измерений в зависимости от температуры соединительного провода.

Температура соединительного провода во время калибровки указывается в сертификате калибровки.

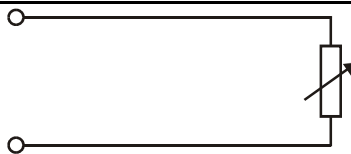
#### Пример:

Платиновый термометр сопротивления Pt 100 с соединительным проводом, длиной 2,5 м (медь, поперечное сечение: 0,25 мм<sup>2</sup>)

Сопротивление соединительного провода при комнатной температуре: 410 мОм

Если соединительный провод находится при температуре 70 °С, то сопротивление петли соединительного провода увеличивается на 492 мОм.

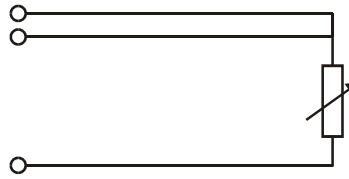
Это соответствует повышению показания температуры на +0,2 К.



Это необходимо учитывать при оценивании неопределённости измерений при калибровке термометра; как правило, получают более высокое значение.

### 8.4.2 Трёхпроводная схема

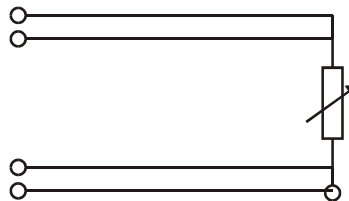
Для уменьшения влияния сопротивлений подводящих проводов и их колебаний, зависящих от температур, в промышленной метрологии применяется *трёхпроводная схема*. Образуются две измерительных цепи, одна из которых используется в качестве опорной. За счёт схемотехники компенсируется сопротивление подводящих проводов как в отношении самого значения, так и в отношении зависимости сопротивления от температуры.



Но так как измерительные приборы, применяемые при калибровке, работают в четырехпроводной схеме подключения, то сопротивление петли необходимо измерять отдельно и компенсировать расчётным путём.

### 8.4.3 Четырёхпроводная схема

Оптимальной схемой подключения является четырёхпроводная схема. Благодаря отдельному подключению цепи тока и напряжения к датчику на результат измерения не оказывает влияние ни сопротивление подводящих проводов, ни зависимость сопротивления от температуры. При этом необходимо удостовериться (напр., на основании данных производителя), что чувствительный элемент также подключён по четырёхпроводной схеме. Если же чувствительный элемент внутри термометра подключён по двухпроводной схеме, это приводит к дополнительному сопротивлению проводов.



### 8.4.4 Паразитная термоэлектродвижущая сила

Измерительная цепь термометра состоит, как правило, не из одного материала. Несколько видов материалов взаимодействуют между собой. Поэтому градиент температуры вдоль измерительной цепи может вызвать появление термического напряжения, которое накладывается на падение напряжения на сопротивлении. В зависимости от направления тока это напряжение суммируется или вычитается, что приводит к систематически более высокому или более низкому калибровочному значению. В результате изменения полярности направления тока при калибровке можно вычислить величину термического напряжения из разницы обоих показываемых значений (при известном измеряемом токе).

При переменном токе и меняющемся постоянном токе этот эффект усредняется и сначала не учитывается. Тем не менее, для заказчика важно рассчитать величину термического напряжения и указать её в сертификате калибровки вместе с условиями проведения измерений калибровки.

#### Пример:

Термометр сопротивления Pt 100


Измеряемый ток: 1 мА

Термическое напряжение: 25 мкВ

Результирующий сдвиг из термического напряжения:

$$\frac{U}{I} = R = \frac{25 \mu\text{V}}{1 \text{ mA}} = 25 \text{ m}\Omega$$

Это соответствует значению температуры в 0,063 К.

	Калибровка термометров сопротивления <a href="https://doi.org/10.7795/550.20180828ACRU">https://doi.org/10.7795/550.20180828ACRU</a>	DKD-R 5-1	
		Выпуск:	08/2019
		Редакция:	0
		Страница:	13 / 28

#### 8.4.5 Самонагрев

Для определения электрического сопротивления следует провести электрическое измерение. Для этого необходимо измеряемый ток пустить через датчик. Измеряемый ток приводит к нагреву датчика (самонагрев) и таким образом к искажению результата измерений. Этот эффект зависит не только от величины измеряемого тока, но и от самих условий проведения измерений. При калибровке необходимо проанализировать механизм самонагрева или же выбрать такой измеряемый ток, при котором этим эффектом можно пренебречь.

Если это не возможно, то калибровочное значение следует экстраполировать до  $I = 0$  А за счёт калибровки при разных измеряемых токах.

#### 8.4.6 Сопротивление изоляции

Сопротивление изоляции термометра измеряется уже при комнатной температуре во время первоначального осмотра. Во время калибровки сопротивление изоляции должно быть также измерено при самой высокой температуре калибровки.

#### 8.4.7 Несимметричное отклонение

Особенно у полупроводниковых датчиков существует вероятность того, что выходной сигнал зависит от направления тока. В данном случае это следует определить во время калибровки и указать в сертификате калибровки.

#### 8.4.8 Гистерезис

Для точных измерений следует также обратить внимание на то, что у многих термометров (также у платиновых термометров сопротивления) проявляется эффект гистерезиса, т.е. связь между температурой и сопротивлением зависит от предыстории термометра. Этот эффект наблюдается, например, если платина тесно связана с керамической подложкой, и в результате разного теплового расширения появляются механические напряжения. У термометров IPRT разница в показании может составлять до 0,5 К, в зависимости от того, применялся термометр до этого при более высоких или более низких температурах.

## 9 Рекалибровка

При измерении термометром нельзя ссылаться на данные сертификата калибровки неограниченный период времени. Влияние различных факторов на термометр во время его использования приводит к изменениям; возникает дрейф термометра. Можно выделить следующие влияющие факторы:

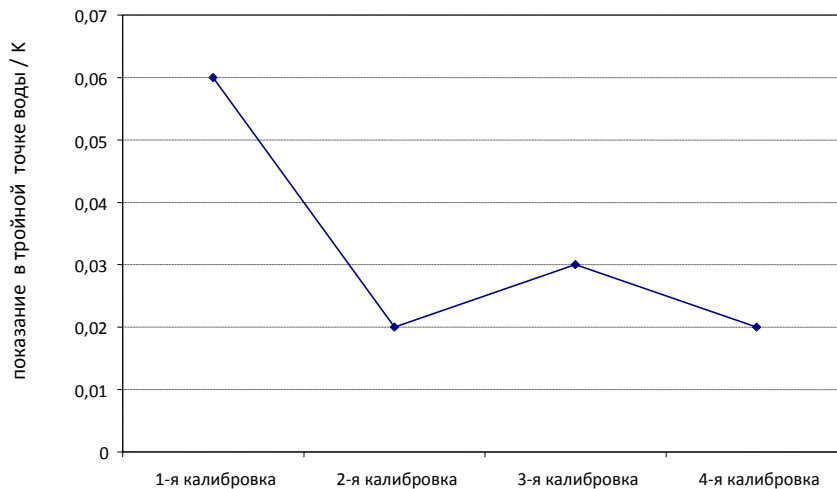
- тепловая нагрузка во время измерения
  - уровень температуры
  - продолжительность использования
  - быстрота изменения температуры
- механическая нагрузка
  - вибрация
  - удары
- химические воздействия
  - диффузия примесей в материал резистора
  - изменение структуры материала резистора


Для получения представления об изменениях необходимо повторно калибровать термометр через определённые интервалы времени. При этом сроки калибровки не могут быть установлены в сертификате калибровки, так как они очень сильно зависят от

требуемой неопределённости измерений и от нагрузок во время эксплуатации термометра. По этой причине пользователь обязан самостоятельно определять сроки калибровки на основании нагрузок во время эксплуатации термометра.

Используя данные, полученные при калибровках, проведённых последовательно в одинаковом температурном диапазоне, можно составить предысторию термометра. Значения дрейфа, установленные в ходе ранее проведённых калибровок, учитываются для дальнейшего оценивания. Пользователь может самостоятельно в индивидуальном порядке установить сроки повторной калибровки в соответствии с требованиями, поставленными к неопределённости измерений и предысторией термометра.

Пример: Термометр сопротивления Pt-100 калибровали в общем четыре раза в тройной точке воды. После первой калибровки во время применения наблюдался дрейф, при дальнейших повторных калибровках значения подтвердились, таким образом, срок калибровки может быть, например, увеличен вдвое.




	Калибровка термометров сопротивления <a href="https://doi.org/10.7795/550.20180828ACRU">https://doi.org/10.7795/550.20180828ACRU</a>	DKD-R 5-1	
		Выпуск:	08/2019
		Редакция:	0
		Страница:	15 / 28

## 10 Результаты

Результатом калибровки является выдача сертификата калибровки.

Сертификат калибровки должен отвечать требованиям документа DAkS-DKD-5 „Инструкция по оформлению сертификата калибровки DKD“. В рамках этой методической инструкции особое внимание необходимо обратить на следующие моменты:

- (e) указание применённых положений или методов  
Рекомендуется в подробностях описать процедуру калибровки.
- (h) результаты измерений и связанные с ними неопределённости измерений или заключение о соответствии с установленной метрологической спецификацией  
Рекомендуется указывать как результаты измерений, так и рассчитанную по ним характеристическую кривую, а также связанные с ними неопределённости измерений.
- (o) Если проводилась юстировка или калибровка калибруемого прибора, то все имеющиеся результаты калибровки должны указываться до и после юстировки или ремонта.  
Особенно это будет проявляться у прямопоказывающих термометров.

	Калибровка термометров сопротивления <a href="https://doi.org/10.7795/550.20180828ACRU">https://doi.org/10.7795/550.20180828ACRU</a>	DKD-R 5-1	
		Выпуск:	08/2019
		Редакция:	0
		Страница:	16 / 28

## Приложение А: Неопределённость измерений при калибровке термометров методом сравнения

Неопределённость измерений при калибровке термометра зависит от применяемого метода калибровки, от неопределённости, обусловленной калибровкой эталонов, от свойств используемых средств измерения, а также от свойств испытательных установок. По этой причине не существует общего предписания для неопределённости измерений определённых типов термометров. Поэтому рассматриваемые в данной главе случаи для определения неопределённости измерений при калибровке нельзя непосредственно переносить на действительно проведённую калибровку; напротив, в каждом отдельном случае оценка вкладов в неопределённость измерений должна проводиться тщательно и в индивидуальном порядке.

Орган по аккредитации установил для аккредитованных лабораторий так называемые „наименьшие выдаваемые неопределённости измерений“. Но эти неопределённости измерений могут быть получены калибровочными лабораториями, как правило, только при использовании самых лучших имеющихся средств измерений и при почти идеальном поведении объекта калибровки. Аккредитованным лабораториям не разрешается указывать в сертификатах калибровки DKD неопределённости измерений, которые являются меньше „наименьших выдаваемых неопределённостей измерений“; зачастую действительная неопределённость измерений бывает больше.


Ниже приводятся примеры для калибровки четырёх разных типов термометров, а именно для

- калибровки прецизионного термометра сопротивления с измерительным мостом AC
- калибровки термометра IPRT с омметром
- калибровки прямопоказывающего электрического термометра
- калибровки термометра с преобразователем и аналоговым выходом

Во всех примерах речь идёт о калибровке методом сравнения в ванне с перемешиваемой жидкостью. При этом температура объекта калибровки определяется с помощью термометра, калиброванного иным способом. Поэтому математическая модель для определения температуры объекта калибровки является во всех случаях в принципе одинаковой и для краткости будет здесь представлена только один раз. Тем не менее на практике некоторые вклады (напр. поправка, обусловленная теплоотводом вдоль объекта калибровки) будут зависеть от соответствующего объекта калибровки.

В последующих примерах будет рассматриваться калибровка только при одной испытательной температуре. Обычно термометры калибруют при разных испытательных температурах, и на основании полученных значений составляется характеристика, неопределённость которой больше, чем неопределённость измерений, полученная при отдельных испытательных температурах.



	Калибровка термометров сопротивления <a href="https://doi.org/10.7795/550.20180828ACRU">https://doi.org/10.7795/550.20180828ACRU</a>	DKD-R 5-1	
		Выпуск:	08/2019
		Редакция:	0
		Страница:	17 / 28

## A.1 Определение температуры объекта калибровки

Во всех примерах этой главы калибровка объекта калибровки осуществляется методом сравнения при номинальной температуре 180 °С. Измерения проводятся в термостате с перемешиваемым маслом без уравнивающего блока. В качестве эталонного термометра используется эталонный термометр SPRT (25 Ом), который был измерен в собственной лаборатории в сравнении с двумя эталонами, калиброванными РТВ. Сопротивление эталонного термометра SPRT определяется с помощью моста для измерения сопротивлений с прямой индикацией температуры и эталонным резистором 100 Ом, которые оба в свою очередь были откалиброваны лабораторией DKD.

Температура, при которой калибруют объект калибровки, определяется посредством измерения обоими эталонными термометрами и дополнительными поправками:


$$t_x = t_N + \delta t_{\text{Kal}} + \delta t_{\text{Drift}} + c_R \delta R_R + \delta t_{\text{Br}} + \delta t_{\text{WaN}} + \delta t_{\text{EWN}} + \delta t_{\text{WAP}} + \delta t_{\text{Hom}} + \delta t_{\text{Stab}}$$

где

- $t_x$  температура объекта калибровки согласно МТШ-90
- $t_N$  среднее значение температуры эталонного термометра SPRT
- $\delta t_{\text{Kal}}$  поправка, обусловленная неопределённостью измерений при калибровке эталонного термометра SPRT
- $\delta t_{\text{Drift}}$  поправка, обусловленная возможным дрейфом эталонного термометра SPRT с момента последней калибровки
- $\delta R_R$  поправка, обусловленная неопределённостью измерений при калибровке эталонного резистора
- $\delta t_{\text{Br}}$  поправка, обусловленная неопределённостью измерений при калибровке моста для измерения сопротивлений
- $\delta t_{\text{WaN}}$  поправка, обусловленная возможным теплоотводом эталонного термометра SPRT
- $\delta t_{\text{EWN}}$  Поправка на самонагрев эталонного термометра SPRT
- $\delta t_{\text{WAP}}$  поправка, обусловленная возможным теплоотводом объекта калибровки
- $\delta t_{\text{Hom}}$  поправка, обусловленная неоднородностью в термостате
- $\delta t_{\text{Stab}}$  поправка, обусловленная временной нестабильностью в ванне
- $c_R$  чувствительность измерительного моста, в выбранном диапазоне действительно  $c_R \cong 10 \text{ K/}\Omega$


Поправки, приведённые в данном списке, чаще всего неизвестны и предположительно очень малы. В качестве наилучшей оценки, как правило, принимается поправка в 0 К, которая тем не менее вносится с неопределённостью. Эти вклады были определены в отдельности следующим образом:

- $t_N$  среднее значение температуры эталонного термометра (SPRT): используемый измерительный мост рассчитывает из введённых коэффициентов функции отклонения, определённых при калибровке, температуру и рассчитывает среднее значение 10-ти отдельных измерений, а также стандартное отклонение среднего значения. В результате измерения отображается средняя температура, равная 180,234 °С со стандартным отклонением среднего значения 1,2 мК.
- $\delta t_{\text{Kal}}$  поправка, обусловленная неопределённостью измерений при калибровке эталонного термометра SPRT: Неопределённость измерений эталонного термометра SPRT при температуре 180 °С составляет согласно сертификату

	Калибровка термометров сопротивления <a href="https://doi.org/10.7795/550.20180828ACRU">https://doi.org/10.7795/550.20180828ACRU</a>	DKD-R 5-1	
		Выпуск:	08/2019
		Редакция:	0
		Страница:	18 / 28

калибровки 15 мК ( $k = 2$ ), стандартная неопределённость измерений, таким образом, 7,5 мК.

- $\delta t_{\text{Drift}}$  поправка, обусловленная возможным дрейфом термометра с момента последней калибровки: ввиду известной предыстории термометра делается заключение о том, что с момента последней калибровки дрейф составит не более  $\pm 6$  мК. Это приводит к неопределённости измерений  $6 \text{ мК} / \sqrt{3} = 3,5 \text{ мК}$ .
- $\delta R_R$  поправка, обусловленная неопределённостью измерений при калибровке эталонного резистора: Относительная неопределённость измерений эталонного резистора, указанная в сертификате калибровки, составляет  $3 \cdot 10^{-6}$  ( $k = 2$ ). При действительном сопротивлении эталонного термометра SPRT 43 Ом это соответствует неопределённости измерений, равной 0,13 мОм ( $k = 2$ ) и стандартной неопределённости измерений 0,07 мОм. Ввиду имеющегося опыта с резистором дрейфом резистора с момента последней калибровки можно пренебречь.
- $\delta t_{\text{Br}}$  поправка, обусловленная неопределённостью измерений моста для измерения сопротивлений. Для используемого диапазона измерения в сертификате калибровки указана расширенная неопределённость измерений ( $k = 2$ ), равная 3 мК. Индикатор моста показывает 6 разрядов, в интерфейсе для регистрации данных отображается 7 разрядов, которые усредняются по времени. Неопределённостями измерений, обусловленными ограниченной разрешающей способностью, можно пренебречь, в отличие от других вкладов в неопределённость измерений.
- $\delta t_{\text{WaN}}$  поправка, обусловленная возможным теплоотводом эталонного термометра SPRT: Вынимание эталонного термометра SPRT из ванны на 20 мм привело к изменению температуры (оценённой приблизительно по причине колебаний температуры в ванне) на 2 мК. Это приводит к стандартной неопределённости измерений  $2 \text{ мК} / \sqrt{3} = 1,2 \text{ мК}$ .
- $\delta t_{\text{EWN}}$  поправка на самонагрев эталонного термометра SPRT: В сертификате калибровки указано, что измеряемый ток, равный 1 мА, в ампуле тройной точки воды привёл к нагреву 2,1 мК. Далее этот вклад учитываться не будет, так как термометр как калибруется, так и применяется при измеряемом токе 1 мА.
- $\delta t_{\text{WAP}}$  поправка, обусловленная возможным теплоотводом объекта калибровки: вынимание объекта калибровки из ванны на 20 мм привело к изменению температуры (оценённой приблизительно по причине колебаний температуры в ванне) на 1 мК, измеренной мостом для измерения сопротивлений. Этот вклад не учитывается. В некоторых примерах ввиду малой разрешающей способности объектов калибровки было бы невозможно установить это воздействие.
- $\delta t_{\text{Hom}}$  поправка, обусловленная неоднородностью в термостате: Из предшествующего анализа известно, что разность температур между калибруемым и эталонным термометрами вследствие неоднородности в ванне может составлять максимально  $\pm 8$  мК. Это приводит к стандартной неопределённости измерений  $8 \text{ мК} / \sqrt{3} = 4,6 \text{ мК}$ .
- $\delta t_{\text{Stab}}$  поправка, обусловленная временной нестабильностью в ванне: Из предшествующего анализа известно, что разность температур между калибруемым и эталонным термометрами вследствие временной нестабильности в ванне может составлять максимально  $\pm 6$  мК. Это приводит к стандартной неопределённости измерений  $6 \text{ мК} / \sqrt{3} = 3,5 \text{ мК}$ .

	Калибровка термометров сопротивления <a href="https://doi.org/10.7795/550.20180828ACRU">https://doi.org/10.7795/550.20180828ACRU</a>	DKD-R 5-1	
		Выпуск:	08/2019
		Редакция:	0
		Страница:	19 / 28

По сравнению с этими вкладами другими воздействиями, как, напр. кратковременной стабильностью измерительных инструментов во время измерения, можно пренебречь.

Отдельные вклады в неопределённость температуры объекта калибровки приводятся кратко в таблице А.1.

Величина	Сокращённое обозначение	Оценка	Стандартная неопределённость	Распределение	Коэффициент чувствительности	Вклад в неопределённость
$t_N$	дисперсия результатов измерений SPRT	180,234 °C	1,2 мК	нормальн.	1	1,2 мК
$\delta t_{Kal}$	калибровка SPRT	0 К	7,5 мК	нормальн.	1	7,5 мК
$\delta t_{Drift}$	дрейф эталонного термометра	0 К	3,5 мК	прямоугол.	1	3,5 мК
$\delta R_R$	эталонный резистор	0 Ом	0,07 мОм	нормальн.	10 К/Ом	0,7 мК
$\delta t_{Br}$	измерительный мост	0 К	1,5 мК	нормальн.	1	1,5 мК
$\delta t_{WaN}$	теплоотвод SPRT	0 К	1,2 мК	прямоугол.	1	1,2 мК
$\delta t_{Hom}$	однородность термостата	0 К	4,6 мК	прямоугол.	1	4,6 мК
$\delta t_{Stab}$	стабильность термостата	0 К	3,5 мК	прямоугол.	1	3,5 мК
$t_x$	температура калибруемого термометра	180,234 °C	10 мК			

Таблица А.1: Неопределённость температуры объекта калибровки

## А.2 Калибровка прецизионного термометра сопротивления с измерительным мостом АС

Сопротивление калибруемого термометра (прецизионного термометра Pt-100) измеряется при температуре  $t_x$ . Для измерения применяются мост для измерения сопротивлений и эталонный резистор, которые применялись также при проведении измерений с эталоном; в данном случае сопротивление измеряется непосредственно при помощи измерительного моста. Для этого измерения получают следующую модель:

$$R(t_x) = R_{MB} + \delta t_{RP} + \delta t_{BrP} + \delta R_{Par} + c_t \cdot \delta T$$

где

$R_{MB}$  показание измерительного моста


$\delta R_R$  поправка, обусловленная неопределённостью измерений при калибровке эталонного резистора

$\delta R_{Br}$  поправка, обусловленная неопределённостью измерений при калибровке моста для измерения сопротивлений

$\delta R_{Par}$  поправка, обусловленная паразитными термоэлектродвижущими силами

$\delta T$  поправка, обусловленная неопределённостью температуры объекта калибровки


$c_t$  чувствительность термометра, составляет здесь 0,4 Ом / К

	Калибровка термометров сопротивления <a href="https://doi.org/10.7795/550.20180828ACRU">https://doi.org/10.7795/550.20180828ACRU</a>	DKD-R 5-1	
		Выпуск:	08/2019
		Редакция:	0
		Страница:	20 / 28

Эти вклады были определены в отдельности следующим образом:

- $R_{MB}$  показание измерительного моста: Используемый измерительный мост высчитывает среднее значение из 10 отдельных измерений сопротивления. В результате считывается сопротивление, равное 168,432 Ом со стандартным отклонением среднего значения 2,2 мОм.
- $\delta R_R$  поправка, обусловленная неопределённостью измерений при калибровке эталонного резистора: Относительная неопределённость измерений эталонного резистора, указанная в сертификате калибровки, составляет  $3 \cdot 10^{-6}$  ( $k = 2$ ); с соотношением от моста при 170 Ом получают неопределённость 0,5 мОм ( $k = 2$ ) и стандартную неопределённость измерений 0,25 мОм. На основании имеющегося опыта с резистором дрейфом резистора с момента последней калибровки можно пренебречь.
- $\delta R_{Br}$  поправка, обусловленная неопределённостью измерений при калибровке моста для измерения сопротивлений. Относительная неопределённость измерений моста для измерения сопротивлений, указанная в сертификате калибровки, составляет  $3 \cdot 10^{-6}$  ( $k = 2$ ), что приводит к стандартной неопределённости измерений, равной 0,15 мОм (относительно эталонного резистора). Индикатор моста показывает 6 разрядов, в интерфейсе для регистрации данных отображается 7 разрядов, которые усредняются по времени. Неопределённостями измерений, обусловленными ограниченной разрешающей способностью, можно пренебречь, в отличие от других вкладов в неопределённость измерений.
- $\delta R_{Par}$  поправка, обусловленная паразитными термоэлектродвижущими силами: Влияние паразитных термоэлектродвижущих сил при измерениях с мостом AC можно не учитывать. Если термометр сопротивления работает с измерительным прибором постоянного тока, то для определения погрешностей измерений, вызванных паразитными термоэлектродвижущими силами, необходимо провести (по согласованию с заказчиком) дополнительные измерения.
- $\delta T$  поправка, обусловленная неопределённостью температуры объекта калибровки: Указанная в таблице А.1 стандартная неопределённость, связанная с температурой объекта калибровки, составляет 10,3 мК.

Данные вклады приводятся кратко в таблице А.2

	Калибровка термометров сопротивления <a href="https://doi.org/10.7795/550.20180828ACRU">https://doi.org/10.7795/550.20180828ACRU</a>	DKD-R 5-1	
		Выпуск:	08/2019
		Редакция:	0
		Страница:	21 / 28

Величина	Сокращённое обозначение	Оценка	Стандартная неопределённость	Распределение	Коэффициент чувствительности	Вклад в неопределённость
$R_{MB}$	считывание показаний измерительного моста	168,432 Ом	2,2 мОм	нормальн.	1	2,2 мОм
$\delta R_R$	эталонный резистор	0 Ом	0,25 мОм	нормальн.	1	0,25 мОм
$\delta R_{Br}$	измерительный мост	0 Ом	0,15 мОм	нормальн.	1	0,15 мОм
$\delta T$	температура калибруемого термометра	0 К	10,3 мК	нормальн.	0,4 Ом/К	4,1 мОм
$R(t_x)$		168,432 Ом	4,66 мОм			
$R(t_x)$					$k = 2$	9,32 мОм


Таблица А.2: Неопределённость сопротивления объекта калибровки

В нормальном случае<sup>1</sup> указываются следующий результат измерений:

Сопротивление термометра IPRT при температуре 180,234 °С составляет 168,432 Ом. Неопределённость измерений составляет 9,4 мОм, что соответствует неопределённости измерения температуры в 24 мК.

Указанную расширенную неопределённость измерений получают из стандартной неопределённости измерения путём умножения на коэффициент расширения  $k = 2$ . Её рассчитывали согласно документу DAkkS-DKD-3. Значение измеряемой величины лежит с вероятностью в 95 % в установленном интервале значений.

<sup>1</sup> Распределение вероятностей, при котором вероятность покрытия 95 % не достигается с помощью коэффициента расширения  $k = 2$ , не является нормальным случаем. В данном случае вышеназванное допущение необходимо изменить. При этом в обязательном порядке должно быть указано значение коэффициента расширения. Более подробную информацию можно получить из документа DKD-3 или в Органе по аккредитации DKD.

	Калибровка термометров сопротивления <a href="https://doi.org/10.7795/550.20180828ACRU">https://doi.org/10.7795/550.20180828ACRU</a>	DKD-R 5-1	
		Выпуск:	08/2019
		Редакция:	0
		Страница:	22 / 28

### А.3 Калибровка прецизионного термометра сопротивления с омметром

Сопротивление калибруемого термометра (прецизионного термометра Pt-100) измеряется при температуре  $t_x$ . Измерение сопротивления калибруемого термометра осуществляется посредством пятиразрядного калиброванного омметра, на который имеется сертификат калибровки DKD. Для данного измерения получают следующую модель:

$$R(t_x) = R_W + \delta R_{\text{Ohm}} + \delta R_{\text{Drift}} + \delta R_{\text{Auf}} + \delta R_{\text{Par}} + c_t \cdot \delta T + \delta R_{\text{Hys}}$$

где

$R_W$  показание омметра

$\delta R_{\text{Ohm}}$  поправка, обусловленная неопределённостью измерений при калибровке омметра

$\delta R_{\text{Drift}}$  поправка, обусловленная дрейфом омметра с момента последней калибровки

$\delta R_{\text{Auf}}$  поправка, обусловленная ограниченной разрешающей способностью омметра

$\delta R_{\text{Par}}$  поправка, обусловленная паразитными термоэлектродвижущими силами

$\delta T$  поправка, обусловленная неопределённостью температуры объекта калибровки

$c_t$  чувствительность термометра, составляет здесь 0,4 Ом / К

$\delta R_{\text{Hys}}$  поправка, обусловленная эффектом гистерезиса

Эти вклады были определены в отдельности следующим образом:

$R_W$  показание омметра: Омметр показывает значение в 168,43 Ом. Стандартное отклонение среднего значения нескольких измерений определяется как 0,005 Ом.

$\delta R_{\text{Ohm}}$  поправка, обусловленная неопределённостью измерений при калибровке омметра. Согласно сертификату калибровки неопределённость измерений омметра составляет 0,020 Ом ( $k = 2$ ), стандартная неопределённость измерений, таким образом, 10 мОм.


$\delta R_{\text{Drift}}$  поправка, обусловленная дрейфом омметра с момента последней калибровки: На основании известной предыстории омметра делается заключение, что дрейф с момента последней калибровки составляет не более  $\pm 20$  мОм. Исходя из этого получают стандартную неопределённость измерений  $20 \text{ мОм} / \sqrt{3} = 11,5 \text{ мОм}$ .

$\delta R_{\text{Auf}}$  поправка, обусловленная ограниченной разрешающей способностью омметра. Ограниченная разрешающая способность омметра в 0,01 Ом позволяет считывание в пределах  $\pm 0,005$  Ом. Исходя из этого получают стандартную неопределённость измерений  $5 \text{ мОм} / \sqrt{3} = 2,9 \text{ мОм}$ .

$\delta R_{\text{Par}}$  поправка, обусловленная паразитными термоэлектродвижущими силами: Определение влияния паразитных термоэлектродвижущих сил осуществлялось путём изменения полярности на омметре. Ввиду ограниченной разрешающей способности омметра этот эффект невозможно было обнаружить, поэтому им можно пренебречь.

$\delta T$  поправка, обусловленная неопределённостью температуры объекта калибровки: Указанная в таблице А.1 стандартная неопределённость, связанная с температурой объекта калибровки, составляет 10,3 мК.

$\delta R_{\text{Hys}}$  поправка, обусловленная эффектом гистерезиса: Было проведено 2 измерения. При одном измерении термометр находился предварительно в соляной ванне при температуре 250 °С, при другом измерении при температуре 0 °С. Результаты отличались друг от друга на 22 мОм. Исходя из этого получают вклад в неопределённость измерений  $22 \text{ мОм} / 2\sqrt{3} = 0 \text{ Ом}$ .

	Калибровка термометров сопротивления <a href="https://doi.org/10.7795/550.20180828ACRU">https://doi.org/10.7795/550.20180828ACRU</a>	DKD-R 5-1	
		Выпуск:	08/2019
		Редакция:	0
		Страница:	23 / 28

Данные вклады приводятся кратко в таблице А.3:

Величина	Сокращённое обозначение	Оценка	Стандартная неопределённость	Распределение	Коэффициент чувствительности	Вклад в неопределённость
$R_W$	считывание показаний омметра	168,43 Ом	5 мОм	нормальн.	1	5 мОм
$\delta R_{Ohm}$	калибровка омметра	0 Ом	10 мОм	нормальн.	1	10,0 мОм
$\delta R_{Drift}$	дрейф омметра	0 Ом	11,5 мОм	прямоуг.	1	11,5 мОм
$\delta R_{Auf}$	разрешающая способность омметра	0 Ом	2,9 мОм	прямоуг.	1	2,9 мОм
$\delta R_{Hys}$	эффект гистерезиса	0 Ом	6,4 мОм	прямоуг.	1	6,4 мОм
$\delta T$	Температура объекта калибровки	0 К	10,3 мК	нормальн.	0,4 Ом/К	4,1 мОм
$R(t_x)$		168,43 Ом	18,0 мОм			
$R(t_x)$					$k = 2$	33,6 мОм

Таблица А.3: Неопределённость сопротивления объекта калибровки

В нормальном случае<sup>2</sup> указываются следующий результат измерений:


Сопротивление термометра IPRT при температуре 180,234 °С составляет 168,43 Ом. Неопределённость измерений составляет 0,04 Ом, что соответствует неопределённости измерения температуры 0,09 °С.

Указанную расширенную неопределённость измерений получают из стандартной неопределённости измерения путём умножения на коэффициент расширения  $k = 2$ . Её рассчитывали согласно документу DAkkS-DKD-3. Значение измеряемой величины лежит с вероятностью в 95 % в установленном интервале значений.

#### А.4 Калибровка прямопоказывающего электрического термометра

Показание  $A(t_x)$  прямопоказывающего электрического термометра считывают при температуре  $t_x$ . При этом речь идёт о термометре Pt-100 со связанным с ним индикатором с разрешающей способностью 0,01 °С. Необходимо найти поправку  $K(t_x)$ , которую нужно суммировать с индикацией для получения правильной температуры. Для данного измерения получают следующую модель:

<sup>2</sup> Распределение вероятностей, при котором вероятность покрытия 95 % не достигается с помощью коэффициента расширения  $k = 2$ , не является нормальным случаем. В данном случае вышеназванное допущение необходимо изменить. При этом в обязательном порядке должно быть указано значение коэффициента расширения. Более подробную информацию можно получить из документа DKD-3 или в Органе по аккредитации DKD.

	Калибровка термометров сопротивления <a href="https://doi.org/10.7795/550.20180828ACRU">https://doi.org/10.7795/550.20180828ACRU</a>	DKD-R 5-1	
		Выпуск:	08/2019
		Редакция:	0
		Страница:	24 / 28

$$K(t_x) = t_x + \delta t_{\text{Auf}} - A(t_x)$$

где

$K(t_x)$  поправка для термометра

$t_x$  температура термометра

$A(t_x)$  считывание показаний термометра

$\delta t_{\text{Auf}}$  поправка, обусловленная ограниченной разрешающей способностью термометра

Эти вклады были определены в отдельности следующим образом:

$t_x$  температура термометра: согласно таблице А.1 температура термометра составляет 180,234 °С со стандартной неопределённостью 10,3 мК.

$A(t_x)$  считывание показаний термометра: термометр показывает температуру 180,25°С. В течение 5 минут измерения эта температура отображалась постоянно; таким образом, статистическим колебанием в пределах разрешающей способности можно пренебречь.

$\delta t_{\text{Auf}}$  поправка, обусловленная ограниченной разрешающей способностью термометра: При разрешающей способности 10 мК считывание возможно только в пределах  $\pm 5$  мК. Исходя из этого получают стандартную неопределённость измерений  $5 \text{ мК} / \sqrt{3} = 2,9 \text{ мК}$ .

Данные вклады приводятся кратко в таблице А.4.

Величина	Сокращённое обозначение	Оценка	Стандартная неопределённость	Распределение	Коэффициент чувствительности	Вклад в неопределённость
$t_x$	температура термометра	180,234 °С	10,3 мК	нормальн.	1	10,3 мК
$A(t_x)$	считывание показаний	180,25 °С	0 мК	нормальн.	1	0 мК
$\delta t_{\text{Auf}}$	разрешающая способность	0 К	2,9 мК	прямоуг.	1	2,9 мК
$K(t_x)$	поправка	-16 мК	10,7 мК			
$K(t_x)$					$k = 2$	21 мК


Таблица А.4: Неопределённость индикации температуры объекта калибровки

В нормальном случае<sup>3</sup> указывается следующий результат измерений:

При температуре 180 °С необходимо прибавить поправку  $K(t_x) = -16 \text{ мК}$  к индикации для получения измеряемой температуры. Неопределённость измерения поправки составляет 21 мК.

<sup>3</sup> Распределение вероятностей, при котором вероятность покрытия 95 % не достигается с помощью коэффициента расширения  $k = 2$ , не является нормальным случаем. В данном случае вышеназванное допущение необходимо изменить. При этом в обязательном порядке должно быть указано значение коэффициента расширения. Более подробную информацию можно получить из документа DKD-3 или в Органе по аккредитации DKD.



	Калибровка термометров сопротивления <a href="https://doi.org/10.7795/550.20180828ACRU">https://doi.org/10.7795/550.20180828ACRU</a>	DKD-R 5-1	
		Выпуск:	08/2019
		Редакция:	0
		Страница:	25 / 28

Указанную расширенную неопределённость измерений получают из стандартной неопределённости измерения путём умножения на коэффициент расширения  $k = 2$ . Её рассчитывали согласно документу DKD-3. Значение измеряемой величины лежит с вероятностью в 95 % в установленном интервале значений.

### A.5 Калибровка термометра сопротивления с подключённым преобразователем

Ток на выходе преобразователя, подключённого к термометру необходимо измерять и калибровать при температуре  $t_x$ . Чувствительный элемент термометра является типом Pt 100. Преобразователь выдает аналоговый сигнал на выходе, который увеличивается линейно с температурой со следующим показанием: 4 мА  $\triangleq$  0 °С, 20 мА  $\triangleq$  320 °С, т.е. изменение на 20 °С приводит к изменению тока сигнала на 1 мА.

Для измерения сигнала на выходе применяется амперметр с разрешающей способностью 1  $\mu$ А, на который имеется сертификат калибровки DKD.

Для данного измерения получают следующую модель:

$$i(t_x) = i_{Am} + \delta i_{AK} + \delta i_{AD} + \delta i_{Um} + c_i \delta T + \delta i_{EW}$$

где

$i_{Am}$  показание амперметра

$\delta i_{AK}$  поправка, обусловленная неопределённостью измерений амперметра

$\delta i_{AD}$  поправка, обусловленная дрейфом амперметра с момента последней калибровки

$\delta i_{Um}$  поправка, обусловленная воздействием окружающей среды на преобразователь

$\delta i_{EW}$  поправка, обусловленная противодействием входного сопротивления электронного блока обработки

$\delta T$  поправка, обусловленная неопределённостью измерений температуры ванны

$c_i$  чувствительность термометра с преобразователем, составляет здесь 50  $\mu$ А/К


Эти вклады были определены в отдельности следующим образом:

$i_{Am}$  показание амперметра: Амперметр показывает измеренное значение 13,103 мА со стандартной неопределённостью среднего значения нескольких измерений 1,7  $\mu$ А.

$\delta i_{AK}$  поправка, обусловленная неопределённостью измерений амперметра: Из сертификата калибровки следует, что при измеряемой токе 94 мА поправка составляет 2,2  $\mu$ А с неопределённостью 1,8  $\mu$ А ( $k = 2$ ). Это приводит к стандартной неопределённости измерений 0,9  $\mu$ А.

$\delta i_{AD}$  поправка, обусловленная дрейфом амперметра с момента последней калибровки: На основании известной предыстории амперметра делается заключение, что дрейф с момента последней калибровки составит не более  $\pm 2$   $\mu$ А. Исходя из этого получают стандартную неопределённость измерений 2  $\mu$ А /  $\sqrt{3} = 1,2$   $\mu$ А.

$\delta i_{Um}$  поправка, обусловленная воздействием окружающей среды на преобразователь: На основании данных от заказчика рабочая температура преобразователя в применении составляет от 40 °С до 60 °С. При калибровке температура преобразователя составляла 52 °С. На основании спецификации производителя максимальное изменение тока на выходе вследствие ожидаемых воздействий может составлять  $\pm 6$   $\mu$ А. Исходя из этого получают стандартную неопределённость измерений 6  $\mu$ А /  $\sqrt{3} = 3,5$   $\mu$ А.

	Калибровка термометров сопротивления <a href="https://doi.org/10.7795/550.20180828ACRU">https://doi.org/10.7795/550.20180828ACRU</a>	DKD-R 5-1	
		Выпуск:	08/2019
		Редакция:	0
		Страница:	26 / 28

$\delta i_{EW}$  поправка, обусловленная противодействием входного сопротивления электронного блока обработки. Согласно техническому паспорту максимальное воздействие составляет 8  $\mu$ A. Исходя из этого получают стандартную неопределённость измерений  $8 \mu\text{A} / \sqrt{3} = 4,6 \mu\text{A}$ .

$\delta T$  поправка, обусловленная неопределённостью измерений температуры ванны: Согласно таблице А.1 температура термометра составляет 180,234 °C со стандартной неопределённостью 10,3 мК.

Данные вклады приводятся кратко в таблице А.5.

Величина	Сокращённое обозначение	Оценка	Стандартная неопределённость	Распределение	Коэффициент чувствительности	Вклад в неопределённость
$i_{Am}$	показание амперметра	13,103 mA	1,7 $\mu$ A	нормальн.	1	1,7 $\mu$ A
$\delta i_{AK}$	калибровка амперметра	2,2 $\mu$ A	0,9 $\mu$ A	нормальн.	1	0,9 $\mu$ A
$\delta i_{AD}$	дрейф амперметра	0 $\mu$ A	1,2 $\mu$ A	прямоуг.	1	1,2 $\mu$ A
$\delta i_{Um}$	температура окружающей среды	0 $\mu$ A	3,5 $\mu$ A	прямоуг.	1	3,5 $\mu$ A
$\delta i_{EW}$	входное сопротивление	0 $\mu$ A	4,6 $\mu$ A	прямоуг.	1	4,6 $\mu$ A
$\delta T$	температура объекта калибровки	0 K	10,3 мК	нормальн.	50 $\mu$ A/K	0,5 $\mu$ A
$K(t_x)$	ток сигнала	13,1052 mA	6,2 $\mu$ A			
$K(t_x)$					$k = 2$	12,4 $\mu$ A


Таблица А.5: Неопределённость тока сигнала преобразователя

В нормальном случае<sup>4</sup> указывается следующий результат измерений:

При температуре 180,234 °C выдаётся ток сигнала, равный 13,1052 mA. Неопределённость измерений составляет 12  $\mu$ A, что соответствует неопределённости температуры 0,17 K.

Указанную расширенную неопределённость измерений получают из стандартной неопределённости измерения путём умножения на коэффициент расширения  $k = 2$ . Её рассчитывали согласно документу DAkkS-DKD-3. Значение измеряемой величины лежит с вероятностью в 95 % в установленном интервале значений. Неопределённость измерений действительна для рабочей температуры преобразователя между 40 °C и 60 °C

<sup>4</sup> Распределение вероятностей, при котором вероятность покрытия 95 % не достигается с помощью коэффициента расширения  $k = 2$ , не является нормальным случаем. В данном случае вышеназванное допущение необходимо изменить. При этом в обязательном порядке должно быть указано значение коэффициента расширения. Более подробную информацию можно получить из документа DKD-3 или в Органе по аккредитации DKD.

	Калибровка термометров сопротивления <a href="https://doi.org/10.7795/550.20180828ACRU">https://doi.org/10.7795/550.20180828ACRU</a>	DKD-R 5-1	
		Выпуск:	08/2019
		Редакция:	0
		Страница:	27 / 28

## Приложение В: Неопределённость измерений при измерениях термометром сопротивления

Вышеприведённые примеры с А1 по А4 относятся к калибровке термометра только при одной испытательной температуре. Обычно термометры калибруют при разных испытательных температурах (температурных точках), при которых обнаруживаются, как правило, разные неопределённости измерений. Однако пользователь использует термометр также для проведения температурных измерений между точками калибровки. Поэтому полезно указывать в сертификате калибровки также данные о применении термометра во всём температурном диапазоне. Для этого зачастую строится характеристическая кривая (см. DKD-R 5-6), неопределённость которой по своей природе больше, чем неопределённость калибровки в одной точке.

Заказчик может использовать термометр при других условиях, отличных от условий калибровки. При определённых обстоятельствах вклады в неопределённость измерений, которыми можно было пренебречь при калибровке, могут доминировать при использовании термометра. Поэтому неопределённость измерений при использовании термометра может быть значительно выше неопределённости измерений при калибровке. Существенные факторы, влияющие на неопределённость измерений при использовании термометров сопротивления приведены кратко в таблице В.1.

Влияющая величина	Оценка	Максимальный вклад в неопредел. измерений
Отклонение температуры между объектом измерения и термометром	Различная глубина погружения, скорость потока, соединение, позиция ...	До 10 % от разности температур между объектом измерения и окружающей средой
Временная нестабильность	Регистрация измерений, проверка термометрами с другой постоянной времени	До величины колебаний температуры
Гистерезис термометра	Анализ влияния предыстории на результат измерения	До 0,5 К
Сопротивление подводных проводов	Расчёт сопротивления подводных проводов	До нескольких К
Паразитная термоэлектродвижущая сила	Изменение полярности	До 0,2 К у Pt 100
Дрейф термометра, долговременная стабильность	Контроль в реперных точках (в точке таяния льда)	До 0,5 К
Электронный блок обработки (у прямопоказывающих термометров)	Паспорт	До 0,5 К

Таблица В.1: Факторы, влияющие на неопределённость измерений при измерениях термометрами сопротивления



Издатель:

**Physikalisch-Technische Bundesanstalt**  
Deutscher Kalibrierdienst  
Bundesallee 100  
38116 Braunschweig

[www.dkd.eu](http://www.dkd.eu)  
[www.ptb.de](http://www.ptb.de)