

# Сбор, обработка и представление первичной технологической информации

Инструментально-программный  
методический комплекс

## ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУР

**Температура — важнейший параметр всех технологических процессов.**

В металлургической промышленности весьма широк диапазон контролируемых температур и разнообразны условия их измерения, поэтому применяют разнообразные методы измерения и измерительные приборы.

Температура тела характеризует **степень нагретости**, которая определяется внутренней кинетической энергией теплового движения молекул.

Температуру можно определить как **параметр теплового состояния**

**Температура — физическая величина, количественно характеризующая меру средней кинетической энергии теплового движения молекул какого-либо тела или вещества.**

Из определения температуры следует, что она **не может быть измерена непосредственно** и судить о ней можно по изменению других физических свойств тел (объема, давления, электрического сопротивления, термоЭДС, интенсивности излучения и т.д.).

В зависимости от диапазона измеряемых температур **различают** две основные группы методов измерения:

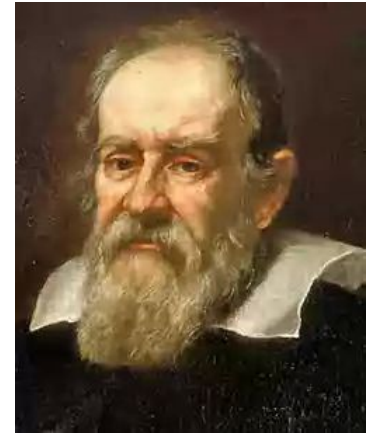
- **контактные** (собственно термометрия);
- **бесконтактные** (пирометрия или термометрия излучения),  
применяемые, в основном, для измерения очень высоких температур

# ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУР

## ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ. ТЕМПЕРАТУРНЫЕ ШКАЛЫ

Чтобы перейти к количественному определению температуры, необходимо установить шкалу температур, т. е. выбрать начало отсчета (нуль температурной шкалы) и единицу измерения температурного интервала (градус).

- Первое достоверно известное устройство для измерения температуры было создано Г. Галилеем около 1595 г.



Галилео Галилей  
(1564-1642)



**Термометр Галилея** представляет собой запаянный стеклянный цилиндр, наполненный жидкостью, в которой плавают стеклянные сферические сосудики-буйки. К каждому такому сферическому поплавку прикреплена снизу золотистая или серебристая бирка с выбитым на ней значением температуры. В зависимости от размера термометра количество поплавков внутри бывает от 3-х до 11-ти. В настоящее время термометр представляет эстетическую ценность в качестве эффектного предмета интерьера.

# ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУР

## ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ. ТЕМПЕРАТУРНЫЕ ШКАЛЫ



- Крупным шагом в развитии термометрии было введение изобретателем ртутного термометра **Фаренгейтом** в начале 18-го века первой **температурной шкалы**, названной его именем, опирающейся на две опорные точки. В качестве нижней опорной точки (0 F) он использовал температуру замерзания насыщенного солевого раствора, самую низкую воспроизводимую в то время, а в качестве верхней точки — температуру тела человека (96 F).

Даниель Габриель Фаренгейт  
(1686 – 1736)

# ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУР

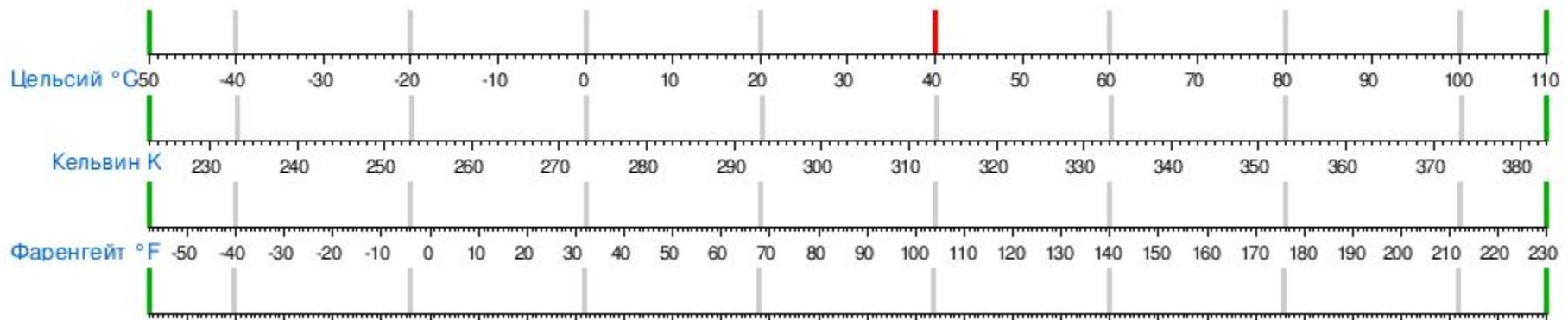
## ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ. ТЕМПЕРАТУРНЫЕ ШКАЛЫ

- Привычная нам десятичная **температурная шкала** была предложена **Андерсом Цельсием** в 1742 году.  
В качестве опорных точек для нее используются температура плавления льда ( $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) и температура кипения воды ( $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ ).

Выбор между опорными точками 100 делений у шкалы Цельсия и 180 делений у шкалы Фаренгейта является чисто условным (как, впрочем, и выбор самих опорных точек).



Андерс Цельсий  
(1701 – 1744)



# ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУР

## ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ. ТЕМПЕРАТУРНЫЕ ШКАЛЫ

Для разметки температурной шкалы чаще всего использовали объемное расширение тел при нагревании, и при построении этих шкал была принята линейная зависимость между объемным расширением жидкости и температурой, т. е.

$$dt = kdV, \quad (5.1)$$

где  $k$  — коэффициент пропорциональности (соответствует относительному температурному коэффициенту объемного расширения).

Интегрирование уравнения (5.1) дает

$$t = kV + D, \quad (5.2)$$

где  $D$  — постоянная интегрирования.

Для определения постоянных  $k$  и  $D$  используют две выбранные температуры  $t'$  и  $t''$ . Приняв при температуре  $t'$  объем  $V'$ , а при температуре  $t''$  объем  $V''$ , получим после ряда промежуточных преобразований уравнение температурной шкалы:

$$t = t' + \frac{V - V'}{V'' - V'} (t'' - t') \quad (5.3)$$

В природе нет жидкостей с линейной зависимостью между коэффициентом объемного расширения и температурой, поэтому показания термометров зависят от природы термометрического вещества (ртути, спирта и т. п.).

# ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУР

## ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ. ТЕМПЕРАТУРНЫЕ ШКАЛЫ

В начале 19-го века английским ученым лордом Кельвином была предложена универсальная абсолютная термодинамическая температурная шкала, не связанная с какими-либо частными свойствами термометрического вещества и пригодная в широком интервале температур. Она стала стандартной в современной термометрии.

Одновременно Кельвин обосновал понятие **абсолютного нуля температуры**. В 1848 г. Кельвин, исходя из второго начала термодинамики, предложил определять температуру на основании равенства

$$\frac{T_2}{T_2 - T_1} = \frac{Q_2}{Q_2 - Q_1}$$

(5.4)

где  $T_1$  и  $T_2$  — температура соответственно холодильника и нагревателя;

$Q_1$  и  $Q_2$  — количество теплоты, полученной соответственно рабочим веществом от нагревателя и отданной холодильнику (для идеальной тепловой машины, работающей по циклу Карно)



# ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУР

## ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ. ТЕМПЕРАТУРНЫЕ ШКАЛЫ

Пусть  $T_2$  равно температуре кипения воды ( $T_{100}$ ), а  $T_1$  — температуре таяния льда ( $T_0$ ); тогда, приняв разность  $T_2 - T_1 = 100$  град и обозначив количества теплоты, соответствующие этим температурам, через  $Q_{100}$  и  $Q_0$ , получим

$$T_0 = \frac{Q_0 \cdot 100}{Q_{100} - Q_0}; \quad T_{100} = \frac{Q_{100} \cdot 100}{(5.5) Q_{100} - Q_0};$$

Таким образом, при любой температуре нагревателя

(5.6)

$$T = \frac{Q \cdot 100}{Q_{100} - Q_0}.$$

Уравнение (5.6) является **уравнением термодинамической шкалы температур**, которая не зависит от свойств термометрического вещества.

# ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУР

## ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ. ТЕМПЕРАТУРНЫЕ ШКАЛЫ

В **термодинамической шкале Кельвина** нижней точкой является точка абсолютного нуля (0 К), а единственной экспериментальной основной точкой — тройная точка воды. Этой точке соответствует значение 273,16 К.

Тройная точка воды (температура равновесия воды в твердой, жидкой и газообразной фазах) выше точки таяния льда на 0,01 град.

Термодинамическую шкалу называют **абсолютной**, если в ней за нуль принята точка на 273,16 К ниже точки плавления льда.

# ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУР

## *ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ. ТЕМПЕРАТУРНЫЕ ШКАЛЫ*

Для обеспечения единства измерений температуры в качестве международного стандарта в 1968 году принята Международная Практическая Температурная Шкала **МПТШ-68** (в настоящее время в качестве стандарта принята уточненная в 1990 году версия шкалы **ITS-90**), использующая в качестве опорных точек температуры изменения агрегатного состояния определенных веществ, которые могут быть воспроизведены.

В интервале между температурами основных реперных точек интерполяцию выполняют по формулам, устанавливающим связь между показаниями эталонных приборов и значениями международной практической температурной шкалы. Кроме того, стандарт определяет типы образцовых средств измерения во всем диапазоне температур. Перечень основных фиксированных точек **МПТШ-68** приведен в табл. 5.1.

На IX Генеральной конференции по мерам и весам в 1948 г. международная практическая температурная шкала была названа **шкалой Цельсия**. Для международной практической шкалы температур и шкалы Цельсия общей является одна постоянная точка (температура кипения воды); во всех остальных точках эти шкалы существенно различаются, особенно при высоких температурах.

# ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУР

## ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ. ТЕМПЕРАТУРНЫЕ ШКАЛЫ

Таблица 5.1

Основные фиксированные точки  
МПТШ-68

Наименование	Температура, К	Образцовое средство измерения
Точка затвердевания золота	1337,58	свыше 1337,58 К — спектральный пирометр от 903,89 К до 1337,58 К — термопара платина/платина-родий (10% Rh)
Точка затвердевания серебра	1235,08	
Точка затвердевания цинка	692,73	от 13,81 К до 903,89 К — платиновый термометр сопротивления
Точка кипения воды	373,15	
Тройная точка воды	273,16	
Точка кипения кислорода	90,188	
Тройная точка кислорода	54,361	
Точка кипения неона	27,102	
Точка кипения равновесного водорода	20,28	
Тройная точка равновесного водорода	13,81	

<b>Метод</b>	<b>Термометрическое свойство</b>	<b>Средства измерения</b>	<b>Выходная величина</b>	<b>Наличие линии связи</b>
Теплового расширения	Линейное тепловое расширение	Дилатометрический термометр	Линейное перемещение	да
	Разность температурных коэффициентов расширения	Биметаллические термометры	Перемещение	да
	Объемное тепловое расширение жидкости	Жидкостные термометры	Перемещение жидкости	да
	Термозависимости давления газов, либо насыщенных паров, либо жидкости в замкнутом объеме	Манометрический термометр	Изменение давления, Па	да
Терморезистивный метод	Термозависимость активного электрического сопротивления	Термопреобразователь сопротивления (термометр сопротивления)	Изменение сопротивления, Ом	да
Термошумовой метод	Термозависимость уровня тепловых шумов	Термошумовой термометр	Напряжение, мV	да

<b>Метод</b>	<b>Термометрическое свойство</b>	<b>Средства измерения</b>	<b>Выходная величина</b>	<b>Наличие линии связи</b>
Термоэлектрический метод	Термозависимость электродвижущей силы	Термоэлектрический преобразователь (термопара)	ТермоЭДС, мВ	да
Магнитный метод	Термозависимость магнитной восприимчивости парамагнитного вещества	Магнитный термометр	Напряжение, В	да
Метод ультразвукового резонанса	Термозависимости распространения звука в веществе	Акустический термометр	Частота, Гц	да
Метод расплавления образцов	Температура фазового перехода	Набор плавких образцов	Изменение формы образцов	
Люминофорный метод	Термозависимость интенсивности излучения в видимом спектре	Люминофоры	Изменение яркости	
Жидкокристаллический метод	Термозависимость цвета	Жидкокристаллические плёнки	Изменение цвета	
Частотный метод измерения температур	Термозависимость частоты колебания специального кварцевого кристалла	Кварцевый термометр	Частота, Гц	да

# ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУР

## МАНОМЕТРИЧЕСКИЕ ТЕРМОМЕТРЫ

- **Манометрический термометр** состоит из термобаллона, капиллярной трубки и манометрической части. Вся система прибора (термобаллон, капиллярная трубка, манометрическая пружина) заполнена рабочим веществом. Термобаллон помещают в зону измерения температуры. При нагревании термобаллона давление рабочего вещества внутри замкнутой системы увеличивается. Увеличение давления воспринимается манометрической трубкой (пружиной), естественным выходным сигналом которой является перемещение.
- Манометрические термометры не очень широко применяют в металлургическом производстве. С помощью этих приборов можно измерять температуру в диапазоне от  $-150$  до  $+600$  °С. Они просты по устройству, надежны в работе, взрыво- и пожаро-безопасны.
- Согласно ГОСТ 8624—80 манометрические термометры имеют классы точности 1,0; 1,5; 2,5; 4,0. Изготавливают манометрические термометры с электрической и пневматической дистанционными передачами показаний. В этих приборах температура преобразуется в унифицированный электрический или пневматический сигнал.

# ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУР

## МАНОМЕТРИЧЕСКИЕ ТЕРМОМЕТРЫ





# ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУР

## ГАЗОВЫЕ МАНОМЕТРИЧЕСКИЕ ТЕРМОМЕТРЫ

- В **газовых манометрических термометрах** система заполнена газом под некоторым начальным давлением.
- В качестве рабочего вещества в газовых термометрах применяют **азот**.
- Зависимость давления газа от температуры при постоянном объеме описывается линейным уравнением, следовательно уравнение шкалы газового манометрического термометра будет также линейным.
- В связи с тем, что при изменении температуры за счет теплового расширения изменяется объем термобаллона, а также изменяется с давлением внутренний объем манометрической пружины, объем термосистемы непостоянен. Поэтому реальное уравнение шкалы несколько отличается от линейного. Однако это отклонение незначительно и можно считать, что шкалы газовых манометрических термометров



# ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУР

## ГАЗОВЫЕ МАНОМЕТРИЧЕСКИЕ ТЕРМОМЕТРЫ

- Диапазон изменения рабочего давления в термосистеме может быть увеличен путем увеличения начального давления азота в термосистеме.
- Это позволяет унифицировать манометрические пружины, а также **уменьшает барометрическую погрешность манометрического термометра** (пружинные манометры измеряют избыточное давление, и поэтому изменение барометрического давления может вызвать изменение их показаний).
- Изменение температуры окружающего воздуха будет влиять на расширение рабочего вещества в капилляре и манометрической пружине, что будет вызывать изменение давления в термосистеме и соответствующее изменение показаний термометра – это **температурная погрешность**.  
Для уменьшения этого влияния стремятся уменьшить отношение внутреннего объема пружины и капилляра к объему термобаллона.
- Область применения газовых термометров в металлургической промышленности – для измерения низких температур при производстве кислорода (водородный термометр может применяться

# ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУР

## ЖИДКОСТНЫЕ МАНОМЕТРИЧЕСКИЕ ТЕРМОМЕТРЫ

- В **жидкостных манометрических термометрах** система заполнена жидкостью.
- В качестве рабочего вещества, заполняющего термосистему, применяют **ртуть, пропиловый спирт, метаксиллол** другие жидкости.
- Рабочее вещество жидкостных манометрических термометров практически несжимаемо. Поэтому изменение объема рабочей жидкости в термобаллоне при изменении температуры на величину, соответствующую диапазону измерения, вызовет такое увеличение давления в термосистеме, при котором манометрическая пружина изменит свой внутренний объем на величину изменения объема жидкости.



# ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУР

## *ЖИДКОСТНЫЕ МАНОМЕТРИЧЕСКИЕ ТЕРМОМЕТРЫ*

**Погрешности** жидкостных манометрических термометров:

- погрешность, вызванная изменением барометрического давления, как правило, отсутствует, так как давление в системе значительно.
- погрешность, вызываемая изменением температуры окружающей среды, имеет место и в жидкостных манометрических термометрах. Для ее уменьшения применяют те же способы, что и в газовых приборах.
- гидростатическая погрешность возникает при различных уровнях расположения термобаллона и измерительного прибора. Для снижения возможных гидростатических погрешностей длину капилляра уменьшают до 10 м.

Жидкостные манометрические термометры предназначены для измерения температуры от  $-150$  до  $+300^{\circ}\text{C}$ .

# ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУР

## КОНДЕНСАЦИОННЫЕ МАНОМЕТРИЧЕСКИЕ ТЕРМОМЕТРЫ

- В **конденсационных** приборах термобаллон частично заполнен низкокипящей жидкостью, а остальное пространство термобаллона заполнено парами этой жидкости. Количество жидкости в термобаллоне должно быть таким, чтобы при максимальной температуре не вся жидкость переходила в пар.
- В качестве рабочей жидкости применяются **фреон-22, пропилен, хлористый метил, ацетон и этилбензол**.
- Эта зависимость давления насыщения пара от температуры имеет нелинейный вид, она однозначная, когда измеряемая температура не превышает критическую.

# ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУР

## КОНДЕНСАЦИОННЫЕ МАНОМЕТРИЧЕСКИЕ ТЕРМОМЕТРЫ

В связи с тем, что давление в термосистеме зависит только от измеряемой температуры, на показания термометра не будет оказывать влияние температура окружающей среды. Практически небольшая погрешность за счет механизма передачи внутри манометра будет иметь место, но сам принцип измерения обеспечивает **независимость от температуры окружающей среды.**

- **Гидростатическая погрешность** в начале шкалы будет больше, а в конце— меньше. Длина капилляра для уменьшения этой погрешности не превышает 25 м.
- **Барометрическая погрешность** у конденсационных манометрических термометров может иметь место на начальном участке шкалы, когда давление в термосистеме невелико. В остальных случаях влияние давления будет пренебрежимо мало.

Специально изготовленные конденсационные манометрические термометры применяются для измерения сверхнизких температур. Конденсационные термометры, заполненные гелием, используются для измерения температур от 0,8 К.

# ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУР

## ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ТЕРМОМЕТРЫ (ТЕРМОПАРЫ)

В основу измерения температуры термоэлектрическими термометрами положен **термоэлектрический эффект**.

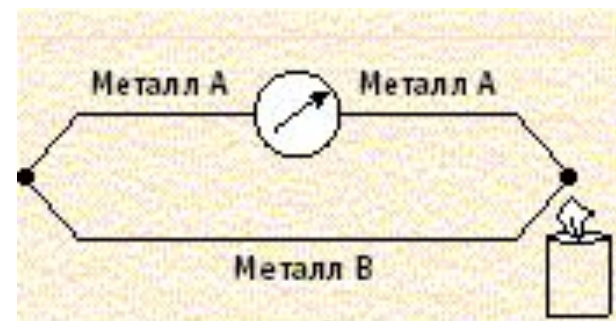
Явление термоэлектричества было открыто немецким физиком **Томасом Иоганом Зеебеком** в 1821 г. и состоит в следующем:

в замкнутой цепи термоэлектрического преобразователя (термопары), состоящего из двух или нескольких разнородных проводников, возникает электрический ток, если хотя бы два места соединения (спая) проводников имеют разные температуры.

Спай, измеряющий температуру  $t$ , называется рабочим, а спай, имеющий постоянную температуру  $t_0$  — свободным. Проводники  $A$  и  $B$  называют термоэлектродами.



Томас Иоган  
Зеебек  
(1770 – 1831)



**ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУР**  
***ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ТЕРМОМЕТРЫ (ТЕРМОПАРЫ)***





# ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУР

## ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ТЕРМОМЕТРЫ (ТЕРМОПАРЫ)

Термоэлектрический эффект объясняется наличием в металле свободных электронов, число которых в единице объема различно для разных металлов. Предположим, что в спае с температурой  $t$  электроны из металла  $A$  диффундируют в металл  $B$  в большем количестве, чем в обратном направлении; поэтому металл  $A$  заряжается положительно, а металл  $B$  — отрицательно.

ТермоЭДС термопары обусловлена тремя причинами.

- **Первая** заключается в зависимости уровня Ферми энергии электронов в проводнике от температуры, что приводит к неодинаковым скачкам потенциала при переходе из одного металла в другой в спаях термопары, находящихся при разных температурах.
- **Во-вторых**, при наличии градиента температуры электроны в области горячего конца проводника приобретают более высокие энергии и подвижность. Вдоль проводника возникнет градиент концентрации электронов с повышенными значениями энергии, что повлечет за собой диффузию более быстрых электронов к холодному концу, а более медленных к горячему. Но диффузионный поток быстрых электронов будет больше. Кроме того, при наличии градиента температуры вдоль проводника возникает дрейф фононов — квантов энергии колебаний кристаллической решетки. Сталкиваясь с электронами, фононы сообщают им направленное движение от более нагретого конца проводника к более холодному.
- **Последние два процесса** приводят к избытку электронов вблизи холодного конца и недостатку их вблизи горячего конца. В результате внутри проводника возникает электрическое поле, направленное навстречу градиенту температуры.
- Таким образом, **термоЭДС термопары возникает только из-за наличия продольного градиента температуры в проводниках, составляющих пару.**

# ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУР

## ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ТЕРМОМЕТРЫ (ТЕРМОПАРЫ)

Электронная теория дает лишь физическое (качественное) объяснение термоэлектрического эффекта. Количественное определение термо-ЭДС на основании этой теории невозможно, так как число свободных электронов, приходящихся на единицу объема, не поддается количественному учету и неизвестен закон их изменения с изменением температуры.

Из сказанного следует, что в простейшей термоэлектрической цепи, составленной из двух разнородных проводников  $A$  и  $B$ , возникают четыре различные термо-ЭДС: две термо-ЭДС в местах спаев проводников  $A$  и  $B$ , термо-ЭДС на конце проводника  $A$  и термо-ЭДС на конце проводника  $B$ .

Учитывая оба фактора, определяющие суммарную термо-ЭДС замкнутой цепи из двух проводников  $A$  и  $B$ , спаи которых нагреты до температур  $t$  и  $t_0$ , обходя цепь в направлении против часовой стрелки, получим

$$E_{AB}(tt_0) = e_{AB}(t) + e_{BA}(t_0), \quad (5.7)$$

где  $E_{AB}(tt_0)$  — суммарная термо-ЭДС, определяемая действием обоих факторов;

$e_{AB}(t)$  и  $e_{BA}(t_0)$  — термо-ЭДС, обусловленные контактной разностью потенциалов и разностью температур концов проводников  $A$  и  $B$ .

# ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУР

## ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ТЕРМОМЕТРЫ (ТЕРМОПАРЫ)

Если температура спаев одинакова, то термо-ЭДС в цепи равна нулю, так как в обоих случаях возникают термо-ЭДС, равные по величине и противоположно направленные ( $e_{BA}(t_0) = -e_{AB}(t_0)$ ).

Следовательно

$$E_{AB}(t, t_0) = e_{AB}(t) - e_{AB}(t_0), \quad (5.8)$$

Термо-ЭДС представляет собой сложную функцию двух переменных величин  $t$  и  $t_0$ , т. е. температур обоих спаев. Поддерживая температуру одного из спаев постоянной, например, полагая  $t_0 = \text{const}$ , получим

$$e_{AB}(t, t_0) = f(t). \quad (5.9)$$

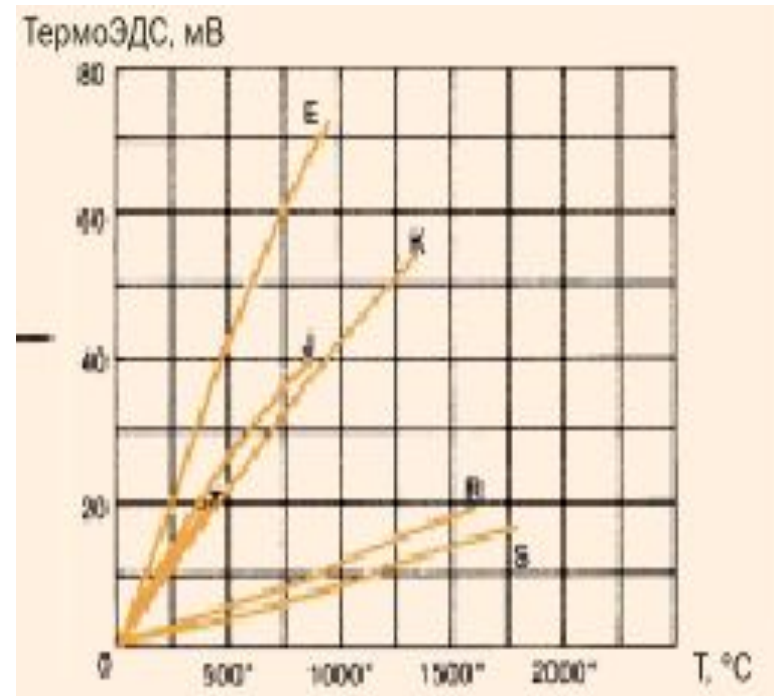
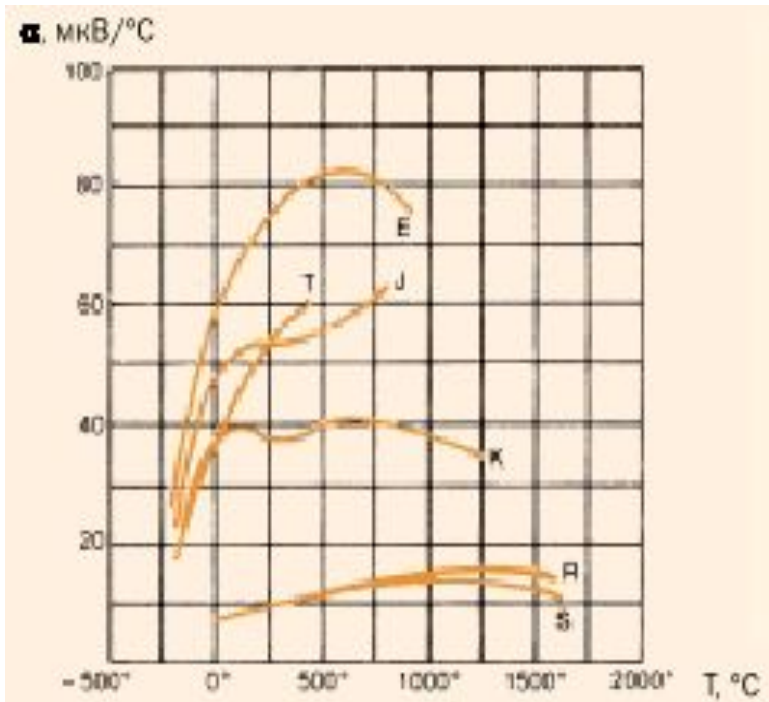
Если для данного термоэлектрического преобразователя экспериментально, т. е. путем градуировки, найдена зависимость (5.9), то измерение температуры сводится к определению термо-ЭДС термометра.

Итак, **измерение температуры с помощью термопар основывается на нормированных калибровочных характеристиках термопар и законах термоэлектричества, установленных опытным путем**

# ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУР

## ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ТЕРМОМЕТРЫ (ТЕРМОПАРЫ)

К сожалению, у большинства термопар зависимость термоЭДС от температуры в некоторых диапазонах имеет нелинейный характер. Основная причина этого — зависимость коэффициента Зеебека от температуры, примерный вид которой показан на рисунках



# ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУР

## ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ТЕРМОМЕТРЫ (ТЕРМОПАРЫ)

Для достижения высокой точности измерений термопарного термометра во всем диапазоне рабочих температур необходима его **калибровка**.

Простейший (и, кстати, наиболее точный) метод калибровки заключается в составлении и размещении в памяти ЭВМ таблицы соответствия значений термоЭДС и температуры, измеренной с помощью образцового термометра. Единственным серьезным недостатком табличного метода является его высокая ресурсоемкость (при широком температурном диапазоне требуется очень большой объем таблицы).

Наряду с табличной используется также полиномиальная аппроксимация:

$$T = A_0 + A_1 X + A_2 X^2 + A_3 X^3 + \dots + A_n X^n$$

Здесь  $T$  — температура,  $X$  — выходное напряжение термопары. Коэффициенты  $A_j$  и порядок полинома  $n$  определяют по градуировочным таблицам для каждого типа термопар.

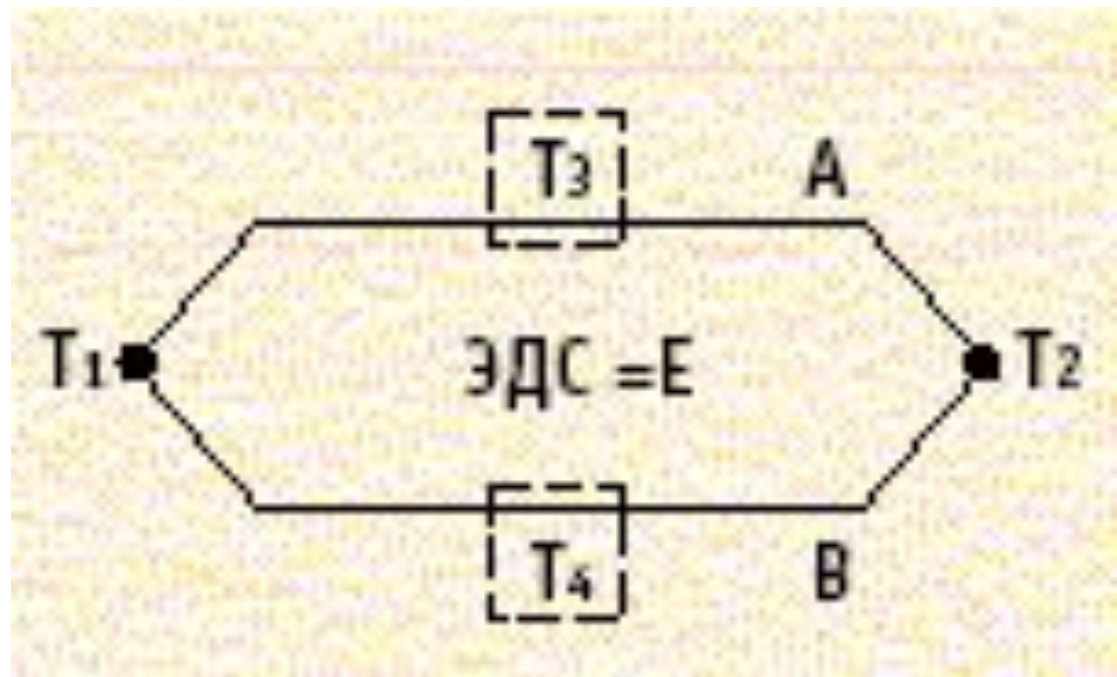
Итак, измерение температуры с помощью термопар основывается на нормированных калибровочных характеристиках термопар и

# ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУР

## ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ТЕРМОМЕТРЫ (ТЕРМОПАРЫ)

### 1. Закон внутренних температур

Наличие температурного градиента в однородном проводнике не приводит к возникновению электрического тока. Таким образом, термоЭДС определяется только разностью температур в местах контакта различных проводников.



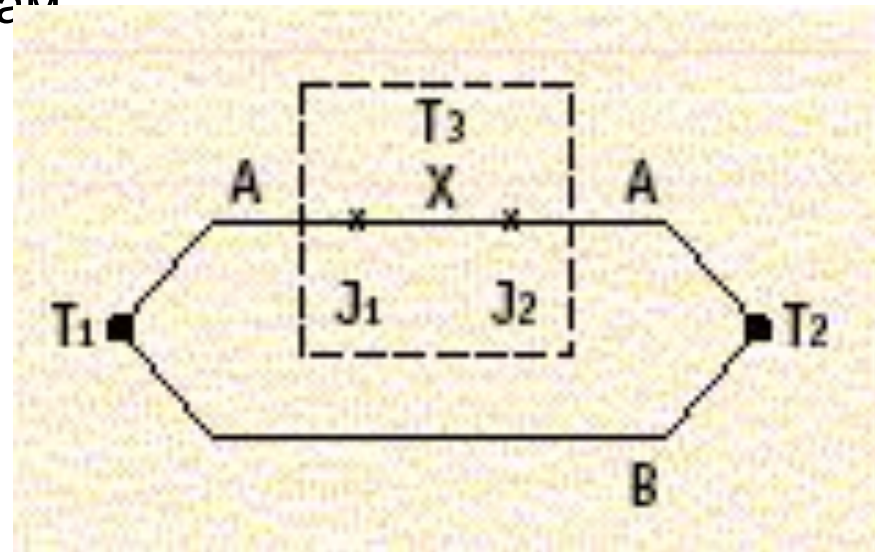
# ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУР

## ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ТЕРМОМЕТРЫ (ТЕРМОПАРЫ)

### 2. Закон промежуточных проводников

Пусть два однородных проводника из металлов А и В образуют термоэлектрическую цепь с контактами, имеющими температуры  $T_1$  и  $T_2$ . В разрыв проводника А включается проводник из металла Х, и образуются два новых контакта —  $J_1$  и  $J_2$ . Если температура проводника Х одинакова по всей длине, то результирующая термоЭДС цепи не изменится. Этот важный закон позволяет:

- а) спаивать (а не сваривать) концы электродов,
- б) использовать удлинительные провода для подключения термопар к измерительным приборам





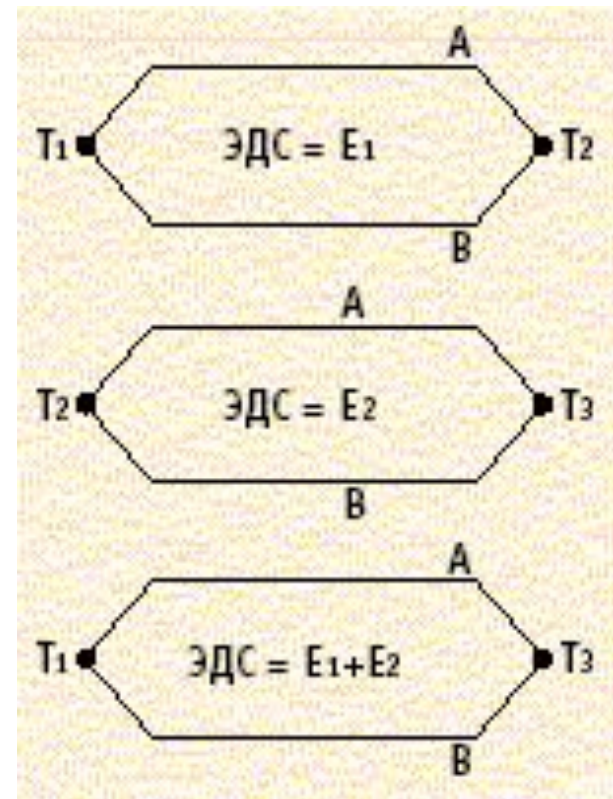
# ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУР

## ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ТЕРМОМЕТРЫ (ТЕРМОПАРЫ)

### 3. Закон промежуточной температуры

Если в цепи, образованной двумя термоэлектродами из разнородных металлов, индуцируется термоЭДС  $E_1$  при температурах контактов  $T_1$  и  $T_2$  и термоЭДС  $E_2$  при температурах контактов  $T_2$  и  $T_3$ , то при температурах  $T_1$  и  $T_3$  ЭДС будет равна  $E_1+E_2$ .

Это означает, что градуировочные таблицы можно использовать и при температуре опорного контакта, не равной  $0^\circ\text{C}$ .





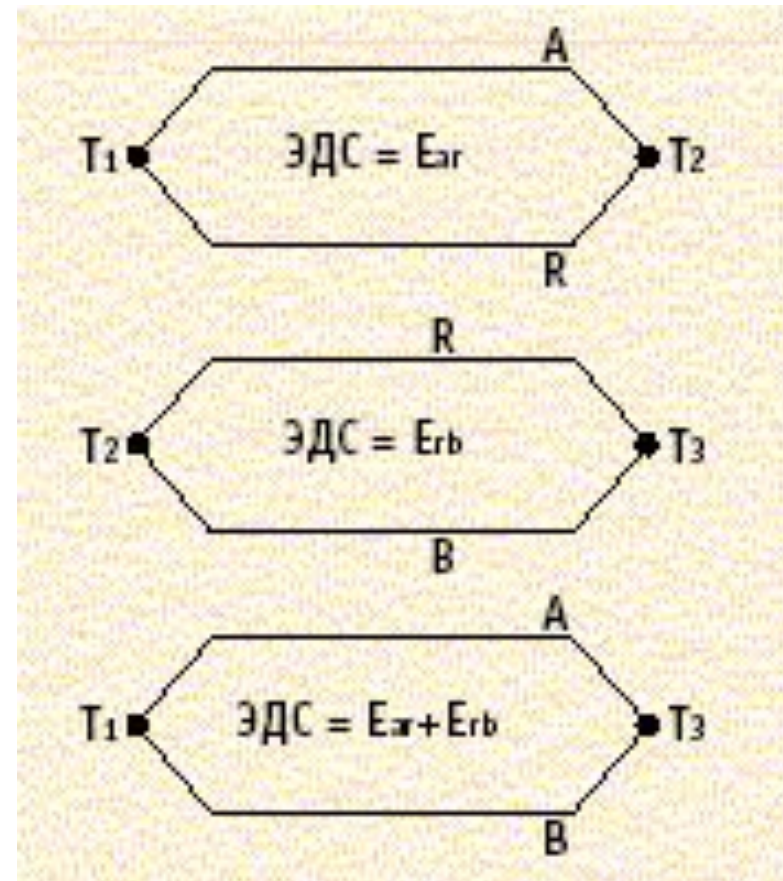
# ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУР

## ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ТЕРМОМЕТРЫ (ТЕРМОПАРЫ)

### 4. Закон аддитивности термоЭДС

Если известны термоЭДС металлов А и В в паре с опорным металлом R, то термоЭДС пары А с В будет равна их сумме.

Это означает, что можно создавать нестандартные комбинации термоэлектродов и по-прежнему пользоваться для них градуировочными таблицами.



# ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУР ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ТЕРМОМЕТРЫ (ТЕРМОПАРЫ)

## ПОПРАВКА НА ТЕМПЕРАТУРУ СВОБОДНЫХ КОНЦОВ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

Выше установлено, что термо-ЭДС преобразователя является функцией измеряемой температуры лишь при условии постоянства температуры  $t_0$ . Термоэлектрический преобразователь градуируют при определенной постоянной температуре  $t_0$  (обычно при  $t_0 = 0$  °С). При измерениях температура  $t_0'$  может отличаться от температуры градуировки. В этом случае необходимо вносить поправку. Если  $t_0' > t_0$  то  $E_{AB}(tt_0') < E_{AB}(tt_0)$ . Разность  $E_{AB}(tt_0) - E_{AB}(t_0't_0')$  и представляет собой поправку. Следовательно, истинное значение термо-ЭДС

$$E_{AB}(tt_0) = E_{AB}(tt_0') \pm E_{AB}(t_0't_0'). \quad (5.10)$$

Знак плюс в формуле (5.10) относится к случаю, когда  $t_0' > t_0$  минус — к случаю, когда  $t_0' < t_0$ . Величину поправки  $E_{AB}(t_0't_0')$  можно получить для данной термопары из градуировочной таблицы или (при небольших значениях разности  $t_0' - t_0$ ) по характеристической кривой.

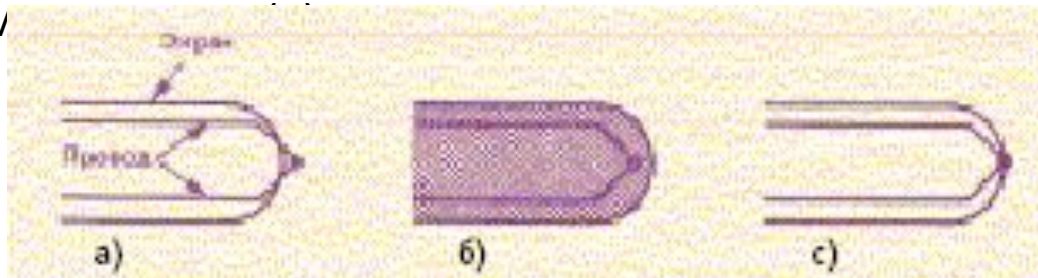
# ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУР

## ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ТЕРМОМЕТРЫ (ТЕРМОПАРЫ)

### ТЕРМОЭЛЕКТРОДНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

Конструкции и материалы для изготовления термопар весьма разнообразны и определяются физическими и химическими свойствами веществ, температуру которых необходимо измерять. Различают три основных типа термопар:

- с открытым контактом (а);
- с изолированным незаземленным контактом (б);
- с заземленным



Термопары с открытым контактом имеют малую коррозионную стойкость и малую постоянную времени и пригодны для измерения температуры жидкости и газа в потоке, а также твердых тел.

Два других типа термопар пригодны для измерений в агрессивных средах.

# **ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУР**

## ***ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ТЕРМОМЕТРЫ (ТЕРМОПАРЫ)***



# ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУР

## *ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ТЕРМОМЕТРЫ (ТЕРМОПАРЫ)*

Любая пара разнородных проводников может образовать ТЭП. Однако не всякий ТЭП пригоден для практического применения, так как современная техника предъявляет к материалам термоэлектродов определенные требования:





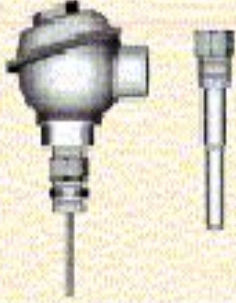
- устойчивость к воздействию высоких температур,
- постоянство термо-ЭДС во времени,
- возможно большая величина термо-ЭДС и однозначная зависимость ее от температуры,
- небольшой температурный коэффициент электрического сопротивления и большая электропроводимость,
- воспроизводимость термоэлектрических свойств, обеспечивающая взаимозаменяемость термоэлектрических термометров.

Всем указанным требованиям не удовлетворяет полностью ни один из известных термоэлектродных материалов, поэтому на практике приходится пользоваться различными материалами в разных пределах измеряемых температур.

Для всех металлов и сплавов функциональная зависимость термо-ЭДС от температуры сложна, и выразить ее аналитически затруднительно.

# ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУР

## ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ТЕРМОМЕТРЫ (ТЕРМОПАРЫ)

					
Конструкция термопары	Неизолированная тонкопроволочная с открытым контактом	Изолированная с открытым контактом	Изолированная на самоклеящейся основе	Изолированная в керамической оболочке	В металлическом корпусе с встроенными клеммами, для установки в гильзу
Допустимая рабочая температура	До 2300 °С	До 500 °С	От -60 °С до +175 °С	До 1100 °С	До 1150 °С
Основные достоинства	Малые размеры, малая постоянная времени, возможность точечного измерения, не отводит тепло от измеряемого объекта	Ограниченная длина проводников для уменьшения ошибок, малая постоянная времени	Малая постоянная времени, малая тепловая инерция, удобная самоклеящаяся основа	Гибкая конструкция, стойкость к истиранию, работа при высоких температурах	Высокая коррозионная стойкость в промышленных условиях, возможность установки в гильзу
Приложения	Биофизика, медицина, криогенная техника, измерение быстро изменяющихся температур. Не подходит для использования в жидкостях и агрессивных средах.	Измерение температур газов и поверхностей. Изоляционная оболочка из тефлона или стекла обеспечивает химическую и термическую стойкость	Измерение температуры поверхностей, легко снимается и устанавливается	Печи, термошкафы, станкостроение	Измерения в тяжелых промышленных условиях, использование с гильзами различных типов



# ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУР

## ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ТЕРМОМЕТРЫ (ТЕРМОПАРЫ)

### ВИДЫ И ХАРАКТЕРИСТИКИ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

Обозначение, ANSI	Тип по ГОСТ*	Материал термоэлектродов		Диапазон рабочих температур	Максимальная погрешность	Цветовая кодировка		
		положительного	отрицательного			ANSI США	МЭК 584-3	DIN 43710
J	—	железо Fe	константан Cu - Ni	от -210 до +1200 °С	2,2 °С или 0,75%			
K	ТХА	хромель Cr - Ni	алюмель Ni - Al	от -270 до +1372 °С	2,2 °С или 0,75% выше 0°С, 2,2 °С или 2% ниже			
T	—	медь Cu	константан Cu - Ni	от -270 до +400 °С	1 °С или 0,75% выше 0°С, 1 °С или 1,5% ниже			
E	—	хромель Cr - Ni	константан Cu - Ni	от -270 до +1000 °С	1,7 °С или 0,5% выше 0°С, 1,7 °С или 1% ниже			
N	—	никросил Ni - Cr - Si	нисил Ni - Si - Mg	от -270 до +1300 °С	2,2 °С или 0,75% выше 0°С, 2,2 °С или 2% ниже			—
R	—	платина-родий (13% Rh)	платина Pt	от -50 до +1768 °С	1,5 °С или 0,25%	—		
S	ТПП	платина-родий Pt - Rh (10% Rh)	платина Pt	от -50 до +1768 °С	1,5 °С или 0,25%	—		
B	ТПР	платина-родий t - Rh (30% Rh)	платина-родий Pt - Rh (6% Rh)	от 0 до +1820 °С	0,5% свыше +800 °С	—	—	
C	ТВР	вольфрам-рений W - Re (5% Re)	вольфрам-рений W - Re (26% Re)	от 0 до +2320 °С	4,5 °С до +425 °С, 1% до +2320 °С	—	—	—

\* Приведены типы, совпадающие с международными стандартами

# ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУР

## *ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ТЕРМОМЕТРЫ (ТЕРМОПАРЫ)*

Тип термопары	Обозначение МЭК	Букв. обозн. НСХ	Химический состав термоэлектродов, мас. %		Пределы измеряемых температур		
			положительный	отрицательный	нижний	верхний	Кратковременно
Медь - константановая ТМКн	Cu-CuNi	T	Cu	Cu + (40-45)Ni + 1.0Mn + 0.7Fe	-200	350	400
Хромель-копелевая ТХК	-	L	Ni + 9.5 Cr	Cu + (42-44)Ni + 0.5Mn + 0.1Fe	-200	600	800
Хромель - константановая ТХКн	NiCr-CuNi	E	Ni + 9.5 Cr	Cu + (40-45)Ni + 1.0Mn + 0.7Fe	-200	700	900
Железо - константановая ТЖК	Fe-CuNi	J	Fe	Cu + (40-45)Ni + 1.0Mn + 0.7Fe	-200	750	900
Хромель-алюмелевая ТХА	NiCr-NiAl	K	Ni + 9.5 Cr	Ni + 1Si + 2Al + 2.5Mn	-200	1200	1300
Нихросил-нисиловая ТНН	NiCrSi-NiSi	N	Ni + 14.2Cr + 1.4Si	Ni + 4.4Si + 0.1Mg	-270	1200	1300



# ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУР

## *ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ТЕРМОМЕТРЫ (ТЕРМОПАРЫ)*

Тип термопары	Обозначение МЭК	Букв. обозн. НСХ	Химический состав термоэлектродов, мас. %		Пределы измеряемых температур		
			положительный	отрицательный	нижний	верхний	Кратковременно
Платинородий-платиновые ТПП13	-	R	Pt + 13Rh	Pt	0	1300	1600
Платинородий-платиновые ТПП10	-	S	Pt + 10Rh	Pt	0	1300	1600
Платинородий-платинородиевая	-	B	Pt + 30Rh	Pt + 6Rh	600	1700	-
Вольфрамрений-вольфрамрениевые (А-1; А-2; А-3)	-	-	W + 5%Re	W + 20%Re	0	2200	2500

# ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУР

## ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ТЕРМОМЕТРЫ (ТЕРМОПАРЫ)

Тип термопары	Рабочие атмосферы				Чувствительность в диапазоне температур	
	окислительная	восстановительная	инертная	вакуум	диапазон, °С	dE/dT, мкВ/°С
ТМКн (Т)	++	+	+	+	0-400	40-60
ТХК	++	-	+	+	0-600	64-88
ТХКн (Е)	++	-	+	+	0-600	59-81
ТЖК (J)	++	++	+	+	0-800	50-64
ТХА (К)	++	-	+	+	0-1300	35-42
ТНН (N)	++	-	+	+	0-1300	26-36
ТПП (R, S)	++	-	+	+	600-1600	10-14
ТПР (В)	++	-	+	+	1000-1800	8-12
ТВР	-	H <sub>2</sub> ++	++	++	1300-2500	14-7

# ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУР

## ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ТЕРМОМЕТРЫ (ТЕРМОПАРЫ)

В качестве основных термопар металлургического производства в диапазоне 1100-1600°С являются **платинородий-платиновые термопары ТПП10 и ТПР**, модификация ТПП13 широко применяется на Западе.

Термопары ТПП10 используются также и в качестве эталонных средств измерения температуры. По совокупности свойств платина и платинородиевые сплавы являются уникальными материалами для термопар. Их основное свойство — хорошее сопротивление газовой коррозии, особенно на воздухе при высоких температурах. Указанное свойство в сочетании с высокой температурой плавления и достаточно большой термо-ЭДС, хорошей совместимостью со многими изолирующими и защитными материалами, а также с хорошей технологичностью и воспроизводимостью метрологических свойств, делает их незаменимыми для изготовления электродов термопар, измеряющих высокие температуры в окислительных средах.

Эти сплавы устойчивы в аргоне и гелии, не растворяют азота и водорода и не образуют нитридов и гидридов, не взаимодействуют с СО и СО<sub>2</sub>. Тем не менее, применять платинородий-платиновые термопары в восстановительных атмосферах не рекомендуется, т.к. в этом случае происходит загрязнение платины и платинородия элементами, восстановленными из защитной или изолирующей керамики (обычно оксидной).

# ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУР

## ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ТЕРМОМЕТРЫ (ТЕРМОПАРЫ)

До  $1200^{\circ}\text{C}$  платина и ее сплавы с родием практически не взаимодействуют с огнеупорными материалами. При более высоких температурах контакт с  $\text{SiO}_2$  ведет к изменению термоЭДС, который в восстановительной атмосфере уже при температуре выше  $1100^{\circ}\text{C}$  ведет к разрушению платины из-за образования силицидов  $\text{PtSi}_2$  и легкоплавкой ( $830^{\circ}\text{C}$ ) эвтектики  $\text{Pt-PtSi}_2$ , отлагающейся по границам зерен. Эта реакция возможна только в присутствии углерода и серы и осуществляется путем восстановления  $\text{SiO}_2$  до  $\text{Si}$ , который в присутствии  $\text{CO}$  соединяется с серой, образуя газообразный  $\text{SiS}_2$ , последний реагирует с платиной.

Таким образом, реакция протекает через газовую фазу и не требует обязательного контакта термоэлектродов с кварцем.  $\text{SiO}_2$  может быть также восстановлен водородом до  $\text{SiO}$  (газ), который также реагирует с платиной. Вообще, кремний — основная причина охрупчивания и разрушения термопар. Он, как и некоторые другие элементы:  $\text{Zn}$ ,  $\text{Sn}$ ,  $\text{Sb}$ ,  $\text{Pb}$ ,  $\text{As}$ ,  $\text{Bi}$ ,  $\text{P}$ ,  $\text{B}$ ,  $\text{S}$  — относятся к платиновым ядам. Пары железа, хрома и марганца также представляют опасность для платиновых термоэлектродов, особенно в вакууме. Взаимодействие с парами металлов приводит к сильному дрейфу термоЭДС и преждевременному разрушению термопары. По этой причине платиновые термопары никогда не устанавливают непосредственно в металлические чехлы. Верхний температурный предел длительного применения термопары ТПП10, равный  $1300^{\circ}\text{C}$ , лимитируется катастрофическим ростом зерна

# ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУР

## ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ТЕРМОМЕТРЫ (ТЕРМОПАРЫ)

В этом диапазоне используется термопара ТПР, с меньшей дифференциальной чувствительностью, но с верхним пределом рабочих температур до 1600°C. Эта термопара механически более прочна, менее склонна к росту зерна и охрупчиванию, менее чувствительна к загрязнениям. Кроме того, малая чувствительность термопары в диапазоне 0-100°C делает возможным применение термопары с медными удлинительными проводами.

Для устойчивой работы термопар из платины и ее сплавов необходима надежная изоляция термоэлектродов высокочистой оксидной керамикой, а также защита корундовыми ( $Al_2O_3$ ) чехлами хорошего качества. Однако газоплотный корундовый чехол с минимальным содержанием примесей имеет сравнительно невысокую термостойкость. Хорошую стойкость к термоударам демонстрирует (скачок температуры не менее 250°C) керамика с невысоким содержанием  $Al_2O_3$  (70-80%) и пористостью 5-10%. Поэтому западные и некоторые российские производители выпускают платиновые термопреобразователи в двойных защитных чехлах: наружный - термостойкий из пористой керамики с содержанием  $Al_2O_3$  на уровне 80% и внутренний - газоплотный из высокочистой керамики (99,5%  $Al_2O_3$ ).

К недостаткам термопар из драгоценных металлов можно отнести уже упоминавшуюся высокую чувствительность термоэлектродов к любым загрязнениям, появившимся при изготовлении, монтаже или эксплуатации термопар, а также их высокая стоимость.

# ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУР

## ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ТЕРМОМЕТРЫ (ТЕРМОПАРЫ)

### Преобразователи термоэлектрические ТПТ Метран-211 и ТПР Метран-212

**Назначение:** преобразователи термоэлектрические ТПТ Метран-211 и ТПР Метран-212 предназначены для измерения температуры в нейтральных и окислительных газовых средах, не взаимодействующих с материалами термоэлектродов и не разрушающих материал защитной арматуры. Герметичны к измерительной среде до  $P_y=0,4$  МПа.

**НСХ:** Б или Я - для ТПТ Метран-211, В - для ТПР Метран-212.

**Диапазон измеримых температур:**

- 0...1300°C (t ном. = 1000°C) - для ТПТ Метран-211 с НСХ - Б,
- 0...1300°C (t ном. = 1000°C) - для ТПТ Метран-211 с НСХ - Я,
- 300...1800°C (t ном. = 1300°C) - для ТПР Метран-212 с НСХ - В.

**Класс допуска:** 2.

**Рабочий спай:** изолированный.

**Количество чувствительных элементов:** 1.

**Материал термоэлектродов:**

для ТПТ Метран-211:

- НСХ (Б) ПР10 ф0,5 мм (+), ПЛ7 ф0,5 мм (-),
- НСХ (Я) ПР13 ф0,5 мм (+), ПЛ7 ф0,5 мм (-);

для ТПР Метран-212:

- НСХ (В) ПР10 ф0,5 мм (+), ПР6 ф0,5 мм (-) или
- ПР10 ф0,4 мм (+), ПР6 ф0,5 мм (-).

**Материал корпуса:** сталь А012.

**Материал защитной арматуры:** согласно табл.2.

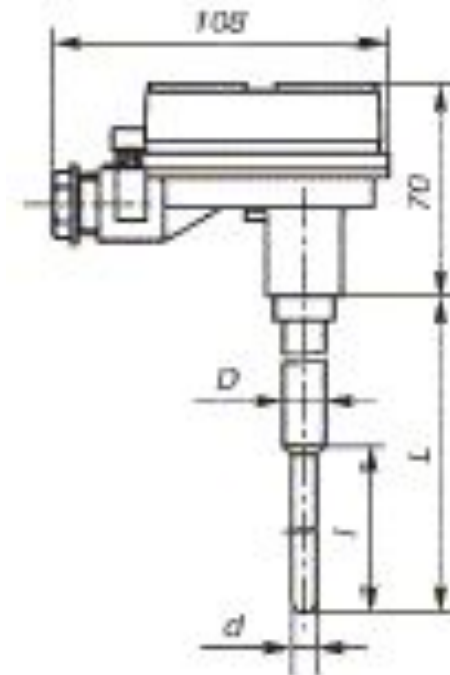
**Способ крепления на объекте:** установка в гнездо.

**Степень защиты:** корпус с соединительной головкой от воздействия пыли и воды IP65 по ГОСТ 14254.

**Климатическое исполнение:** У3 по ГОСТ 15150, но для значенной температуры окружающего воздуха от -45° до 85°C; Т3 по ГОСТ 15150, но для значенной температуры окружающего воздуха от -30° до 85°C с относительной влажностью до 98% при температуре 35°C.

**Средний ресурс:** при номинальной температуре измерения не менее 6500 ч.

**Методика поверки:** в соответствии с ГОСТ 8.338.



# ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУР

## ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ТЕРМОМЕТРЫ (ТЕРМОПАРЫ)

Термопары **вольфрам-рениевые ТВР** имеют самый высокий предел длительного применения  $2200^{\circ}\text{C}$ , но только в неокислительных средах, т.к. катастрофическое окисление и разрушение термоэлектродов происходит уже при температуре  $600^{\circ}\text{C}$ . Термопара устойчива в аргоне, гелии, сухом водороде и азоте, а также в вакууме. Основной недостаток — плохая воспроизводимость термо-ЭДС, вынуждающая группировать термоэлектродные пары по группам с номинальными статическими характеристиками А-1, А-2, А-3.



# ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУР

## ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ТЕРМОМЕТРЫ (ТЕРМОПАРЫ)

Наиболее массовыми типами термопар в промышленности России являются термопара **хромель-копель** (на Западе применяется похожая термопара хромель-константан, тип E) с температурой длительного применения до 600°C и термопара **хромель-алюмель** (тип K) с температурой длительного применения до 1200°C.



Термопара **хромель-копель** обладает наибольшей дифференциальной чувствительностью из всех промышленных термопар, применяется для проведения точных измерений температуры, а также для измерения малых разностей температур. Термопарам свойственна исключительно высокая термоэлектрическая стабильность при температурах до 600°C, обусловленная тем, что изменения термо-ЭДС хромелевого и копелевого термоэлектродов направлены в одну и ту же сторону и компенсируют друг друга. Технический ресурс термопар составляет несколько десятков тысяч часов. Недостаток — высокая чувствительность к деформации.



# ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУР

## ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ТЕРМОМЕТРЫ (ТЕРМОПАРЫ)

**Термопара ТХА** имеет широкий диапазон измеряемых температур, но применять ее во всем диапазоне нецелесообразно, т.к. это ухудшает точность измерений. Термопарой, которой пользуются для точного измерения температур до  $500^{\circ}\text{C}$ , не следует измерять более высокие температуры и, наоборот, термопарой, использовавшейся при температурах выше  $900^{\circ}\text{C}$ , нельзя измерять температуры  $300-600^{\circ}\text{C}$ . При высоких температурах в термоэлектродах образуются локальные неоднородности, происходит дрейф термоЭДС.



# ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУР

## ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ТЕРМОМЕТРЫ (ТЕРМОПАРЫ)

В **термопарах ТХА** наблюдаются два вида нестабильности термоЭДС:

- необратимая нестабильность, постепенно накапливающаяся со временем
- обратимая циклическая нестабильность.

Первый вид нестабильности обусловлен взаимодействием термоэлектродов с окружающей средой. Дрейф термоЭДС в градусах составляет не более 1% от измеряемой температуры на уровне 1000°C за 1000-4000 часов при диаметре термоэлектродов более 1 мм.

Второй вид нестабильности обусловлен протеканием в хромеле превращений по типу ближнего упорядочения магнитных ячеек структуры сплава в интервале 250-550°C. В результате этих превращений термопары ТХА в состоянии поставки после нагрева при 250-550°C увеличивают термоЭДС относительно номинальных значений. Этот рост исчезает (магнитная структура разупорядочивается) после нагрева при более высоких температурах.

Вот почему фирма АВВ Automation Products (ФРГ) поставляет свои термоэлектродные материалы для термопар типа К только после дополнительного “отжига на упорядочение”.

# ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУР

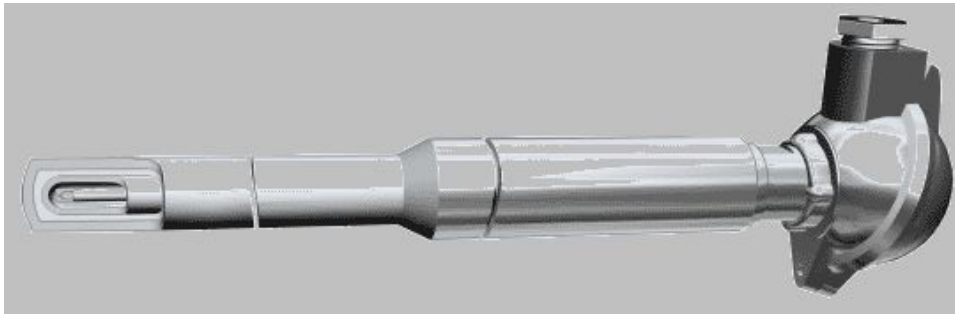
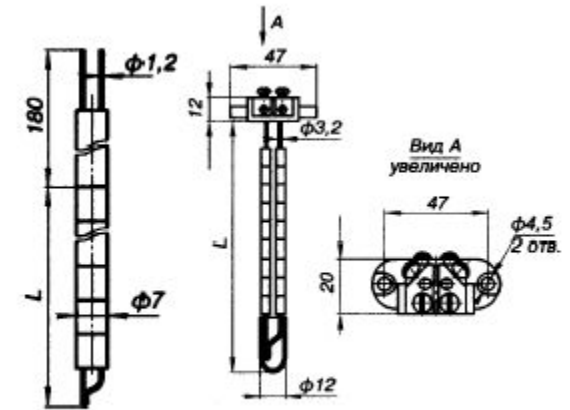
## ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ТЕРМОМЕТРЫ (ТЕРМОПАРЫ)

Термопара **хромель-копель** обладает наибольшей дифференциальной чувствительностью из всех промышленных термопар, применяется для проведения точных измерений температуры, а также для измерения малых разностей температур. Термопарам свойственна исключительно высокая термоэлектрическая стабильность при температурах до  $600^{\circ}\text{C}$ , обусловленная тем, что изменения термо-ЭДС хромелевого и копелевого термоэлектродов направлены в одну и ту же сторону и компенсируют друг друга. Технический ресурс термопар составляет несколько десятков тысяч часов. Недостаток — высокая чувствительность к деформации.

Термопары **хромель-алюмель** и **хромель-копель** предназначены для измерения температуры в окислительных и инертных средах. Содержание кислорода в окислительной атмосфере должно быть не менее нескольких процентов или его присутствие должно быть практически исключено. В атмосфере, содержащей менее 2-3% (объемн.) кислорода в хромеле резко усиливается селективное окисление хрома, что ведет к существенному уменьшению термоЭДС хромеля, а интеркристаллитный характер коррозии — к охрупчиванию (“зеленая гниль”). Длительное пребывание в вакууме при высоких температурах сильно уменьшает термо-ЭДС хромеля вследствие испарения хрома. В атмосфере, содержащей серу, интеркристаллитная коррозия охрупчивает термоэлектроды, в первую очередь алюмель. Кроме того,  $\text{SO}_2$  сильно окисляет хромель и является поэтому причиной большого отрицательного дрейфа термоЭДС. Рабочий ресурс термопар ТХА при температуре менее  $850^{\circ}\text{C}$  лимитируется только величиной дрейфа термо-ЭДС, а при  $1000-1200^{\circ}\text{C}$  — жаростойкостью термоэлектродов.

# ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУР

## ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ТЕРМОМЕТРЫ (ТЕРМОПАРЫ)



# ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУР

## ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ТЕРМОМЕТРЫ (ТЕРМОПАРЫ)

Защитные газоплотные чехлы термопреобразователей существенно расширяют диапазон применения термопар в агрессивных средах и увеличивают их ресурс. Для температур до 800°С применяются чехлы из нержавеющей стали типа **X18H10T** или **10X17H13M2T** (повышенная устойчивость к межкристаллитной коррозии), при более высоких температурах использовалась, в основном, ферритная сталь **15X25T** с температурой интенсивного окалинообразования 1050°С, которая имеет ограниченную свариваемость и склонна к охрупчиванию в диапазоне 450-850°С.

В настоящее время производятся также термопары ТХА в защитных чехлах из жаростойкой аустенитной стали типа **X23H18**, с такой же жаростойкостью в сочетании с хорошей свариваемостью. Для работы при температурах выше 1000°С потребителю предлагаются термопары ТХА в чехлах из сплавов **XH78T** и **XH45Ю** на никелевой и железо-никелевой основах, соответственно. По ГОСТ 5632-72 температура интенсивного окалинообразования сплава **XH78T** составляет 1150°С, рекомендуемая максимальная температура длительного применения сплава **XH45Ю** на воздухе 1250-1300°С, т.е. **она перекрывает весь диапазон измеряемых температур термопары ТХА**. Необходимо только учитывать, что сплав **XH78T** особенно чувствителен к содержанию серы в рабочей среде из-за высокого содержания никеля в сплаве. Образование легкоплавких соединений сернистого никеля приводит к разрушению чехла. Сплав **XH45Ю** обладает отличной жаростойкостью, сохраняя хорошую коррозионную стойкость благодаря включению в сплав 3.4% Al, который образует на поверхности сплава тугоплавкую окисную пленку и препятствует развитию коррозионного процесса. Скорости коррозии этих сплавов в 7-10 раз меньше, чем стали **15X25T** при тех же условиях эксплуатации.

# ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУР

## ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ТЕРМОМЕТРЫ (ТЕРМОПАРЫ)

Марка материала	Рекомендуемая температура применения	Макс. температура (окалинообразования), °С	Устойчивость к агрессивным средам
08X13	650	750	серосодержащим неустойчива к соляной, серной кислоте
12X18H10T	800	850	
08X20H14C2	900	1000	Углеродосодержащим растворы серной (до 10%) кислоты при темп. до 400°С
10X17H13M2T	-	900	
15X25T	950	1050	серосодержащим газовый поток продуктов сгорания
XH45Ю	-	1300	
XH78T	-	1200	неустойчива к сере

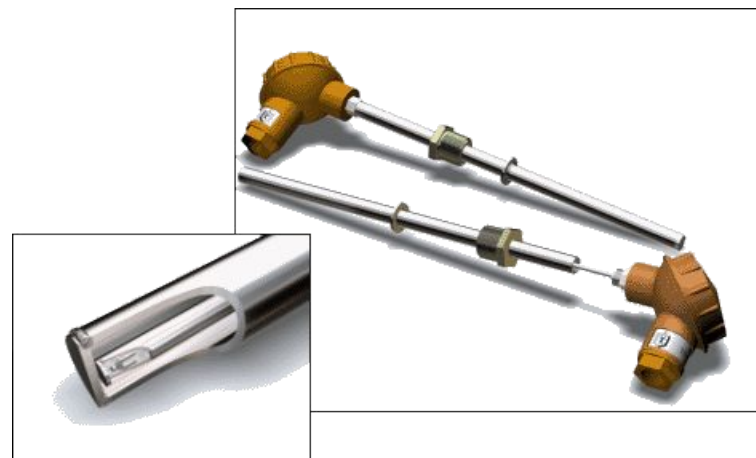
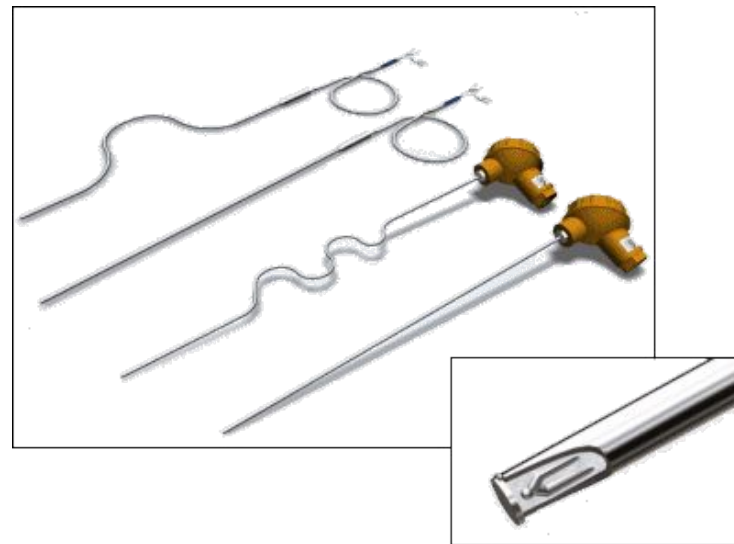
# ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУР

## ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ТЕРМОМЕТРЫ (ТЕРМОПАРЫ)

В настоящее время широкое распространение в мире, в т. ч. и в России, получили **термопарные кабели**, представляющие собой пару термоэлектродов помещенную внутрь металлической трубки и изолированную от нее уплотненным плавленным порошком MgO-периклазом.

В России выпускают термопарный кабель двух типов **КТМС-ХА** и **КТМС-ХК** диаметров от 1 до 7.2 мм по ТУ 16-505.757-75. Оболочка кабеля изготовлена из нержавеющей стали или жаростойкой стали или сплава.

Термоэлектроды термопары со стороны рабочего торца сварены между собой лазерной сваркой, образуя рабочий спай внутри стальной оболочки термопарного кабеля. Рабочий торец заглушен приваренной стальной пробкой. Свободные концы термоэлектродов подключаются к клеммам головки термопреобразователя или компенсационным проводам.





# ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУР

## *ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ТЕРМОМЕТРЫ (ТЕРМОПАРЫ)*

Применение кабельных термопреобразователей позволяет достичь существенных **преимуществ** по сравнению с термопарами традиционного исполнения, таких как:

- повышенные в 2-3 раза термоэлектрическая стабильность и рабочий ресурс при сравнимых рабочих условиях;
- возможность изгибать, укладывать в труднодоступные места, в кабельные каналы, приваривать, припаивать или просто прижимать к поверхности для измерения ее температуры, при этом монтажная длина может достигать 60-100 метров;
- малый показатель тепловой инерции, позволяющий применять их при регистрации быстропротекающих процессов;
- блочно-модульное исполнение термопреобразователей в защитных чехлах, обеспечивающее дополнительную защиту термоэлектродов от воздействия рабочей среды и возможность оперативной замены чувствительного элемента;
- универсальность применения в различных условиях эксплуатации, хорошая технологичность, малая материалоемкость.



# ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУР

## *ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ТЕРМОМЕТРЫ (ТЕРМОПАРЫ)*

### СПОСОБЫ КОМПЕНСАЦИИ ИЗМЕНЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ СВОБОДНЫХ КОНЦОВ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

Правильное измерение температуры возможно лишь при постоянстве температуры свободных концов, обеспечиваемом применением соединительных проводов и специальных термостатирующих устройств. Соединительные провода в данном случае предназначены для удаления свободных концов ТЭП возможно дальше от объекта измерения, т. е. от зоны с меняющейся температурой.

- Как правило, термоэлектродные провода для ТЭП, изготовленных из неблагородных металлов, выполняют из тех же материалов, из которых изготовлены термоэлектроды ТЭП. Исключение составляет хромель-алюмелевый ТЭП, для которого с целью уменьшения сопротивления линии в качестве термоэлектродных проводов часто применяют медь в паре с константаном.
- Для платиnorodий-платиновых ТЭП в качестве термоэлектродных проводов используют медь в паре с медноникелевым сплавом (99,4 % Си +- 0,6 % Ni). Эти провода при температуре до 100 °С в паре развивают такую же термо-ЭДС, которую развивает и платиnorodий-платиновый

# ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУР

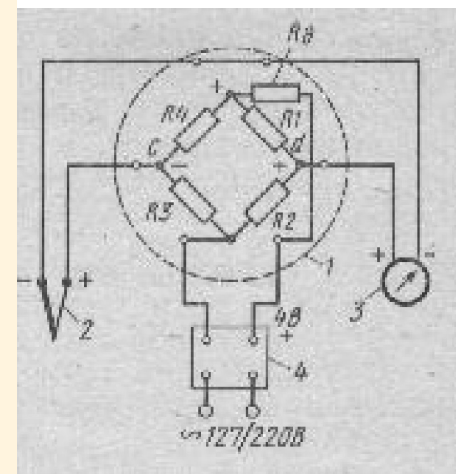
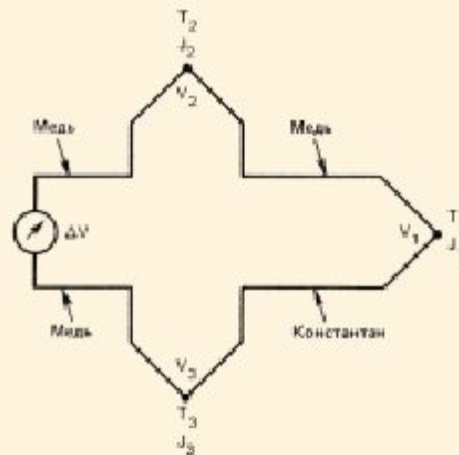
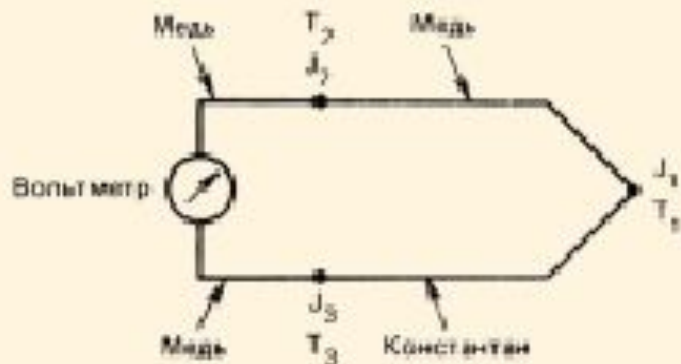
## *ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ТЕРМОМЕТРЫ (ТЕРМОПАРЫ)*

При подключении термопар к измерительным устройствам обязательно возникают дополнительные контакты между термопарой и соединительными проводниками. Допустим, мы хотим подключить термопару медь-константан с рабочим спаем J1, имеющим температуру  $T_1$ , и свободными концами с температурой  $T_2$ , к вольтметру медными проводниками и непосредственно измерить термоЭДС.

В этом случае показания вольтметра не будут соответствовать истинной разности температур  $T_1$  и  $T_2$  для термопары медь-константан, поскольку, подсоединив термопару, мы получим два новых контакта J2 и J3 с температурами  $T_2$  и  $T_3$ . Контакт J2 (медь-медь) не вносит в цепь паразитной термоЭДС, но контакт J3 (константан-медь) образует новую термопару, спай которой находится при температуре  $T_3$ , вносящую в цепь дополнительную термоЭДС, противоположную по знаку термоЭДС от спаия J1. Таким образом, для того чтобы определить неизвестную температуру  $T_1$ , нужно знать температуру  $T_3$  (ее можно, например, измерить другим датчиком температуры или привязать к известной температуре, погрузив J3 в ледяную ванну).

Существует несколько программных и аппаратных способов обеспечения точности измерений с помощью термопар, из которых наибольшее распространение получил метод схемы компенсации холодного спаия (в англоязычной литературе — СС).

# ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУР ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ТЕРМОМЕТРЫ (ТЕРМОПАРЫ)



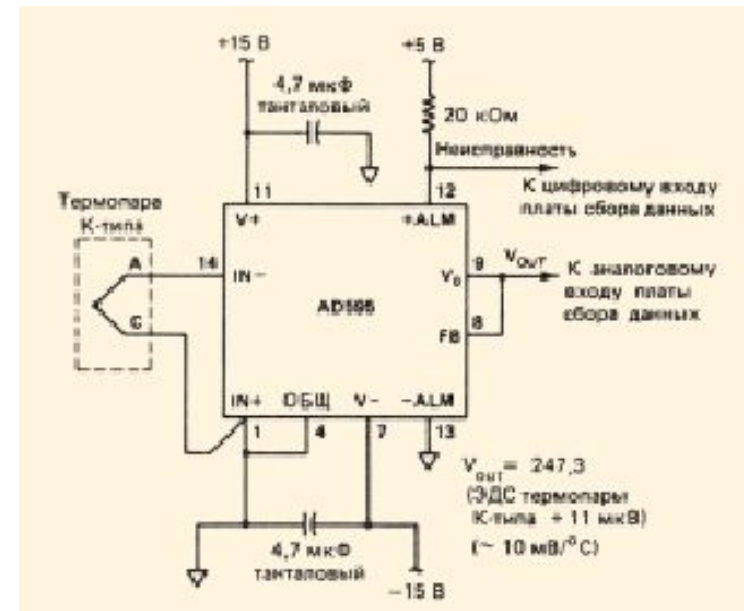
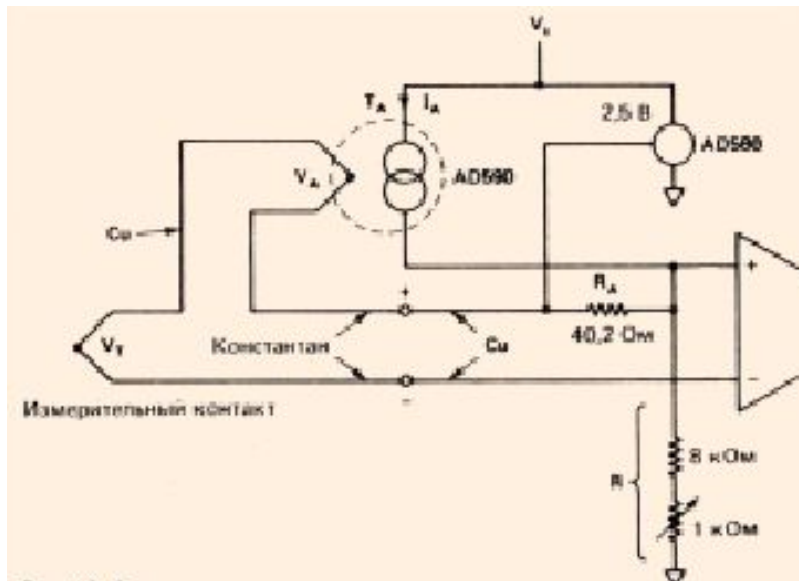
Суть его заключается во введении в измерительную цепь источника напряжения с ЭДС, равной по величине и противоположной по знаку термоЭДС контакта  $J_3$ . Разумеется, эта ЭДС должна также зависеть от температуры окружающего воздуха. В производственных условиях для автоматического введения поправки на температуру свободных концов ранее применяли мостовые электрические схемы. ТЭП включают последовательно с неуравновешенным мостом, три плеча которого  $R_1, R_2$  и  $R_3$  выполнены из манганина, а четвертое  $R_4$  — из меди.

От ТЭП до компенсационного моста прокладывают термоэлектродные провода, от моста до измерительного прибора — медные.

# ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУР

## ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ТЕРМОМЕТРЫ (ТЕРМОПАРЫ)

В приведенной схеме использован **интегральный полупроводниковый датчик температуры** окружающего воздуха AD590 и источник опорного напряжения AD580. Существуют также специальные микросхемы для подключения термопар, содержащие устройства компенсации холодного спая, усилители и схемы контроля исправности термопар. Примером, правда, несколько устаревшим, может служить микросхема AD595. Обычно такие устройства уже входят в состав готовых измерительных модулей и контроллеров для подключения термопар, и у пользователя не возникает необходимости создавать и настраивать их самому.



# ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУР

## ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ТЕРМОМЕТРЫ (ТЕРМОПАРЫ)

### ОСНОВНЫЕ ИСТОЧНИКИ ПОГРЕШНОСТИ ПРИ ИЗМЕРЕНИИ ТЕМПЕРАТУРЫ С ПОМОЩЬЮ ТЕРМОПАР

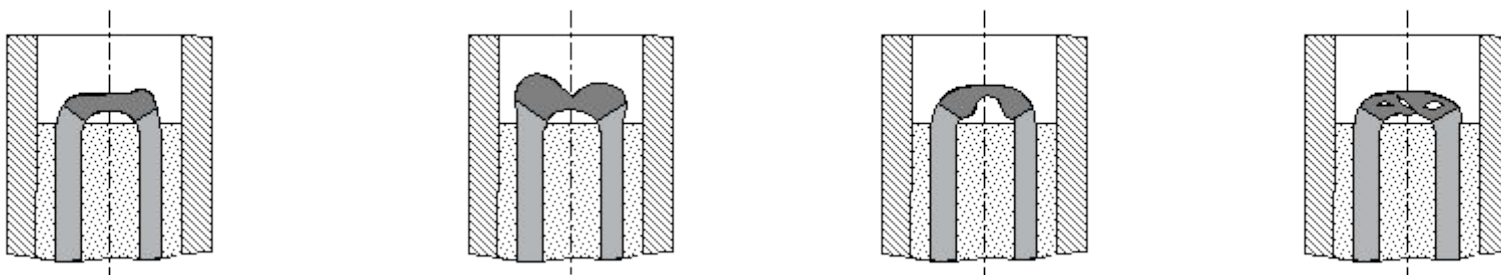
- **Плохой контакт в месте спая и раскалибровка**

Для соединения разнородных металлов между собой чаще всего применяются пайка припоем и сварка. При температурах, близких к точке плавления припоя, возможно нарушение контакта и даже разрыв термопары (эту ситуацию можно выявить по изменению характеристик термопары). Термопары, соединенные с помощью сварки, выдерживают более высокие температуры, однако при сварке структура и химический состав проводников могут деградировать, что приводит к возникновению погрешностей. Раскалибровка термопары (возникновение несоответствия рабочей характеристики термопары калибровочному полиному) также может являться результатом химического изменения материала термоэлектродов под действием высоких температур. Чтобы уменьшить такие погрешности, можно прибегнуть к повторной калибровке или замене термопары.

# ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУР

## ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ТЕРМОМЕТРЫ (ТЕРМОПАРЫ)

- а) дефектов нет
- б) несплавление термоэлектродов
- в) утонение зоны сварного шва
- г) микротрещины и поры в зоне сварного шва



Известны традиционные способы выявления дефектов рабочих спаев:

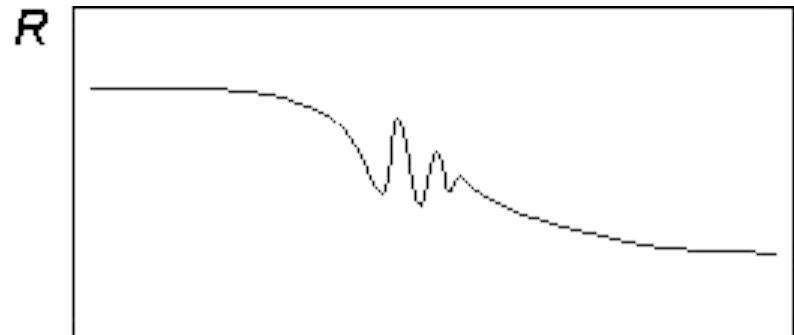
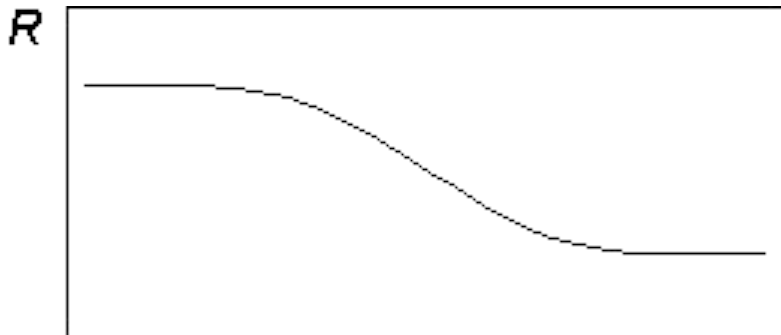
- внешний осмотр;
- внешний осмотр с применением оптических приборов;
- рентгеновское просвечивание;
- проведение термоударов.

# ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУР

## ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ТЕРМОМЕТРЫ (ТЕРМОПАРЫ)

Ни один из вышеперечисленных методов не дает полного представления о наличии и количестве дефектов.

Применение термоударов для дефектоскопии рабочих спаев термопреобразователей предполагает нагрев и выдержку рабочего спаев при температуре  $400^{\circ}\text{C}$  в течение 5 минут с последующим резким охлаждением в воде. На чувствительной аппаратуре ведется запись переходного процесса изменения электросопротивления термопреобразователя. При наличии дефектов в спае процесс охлаждения идет не монотонно, что определяется по выбросам на диаграмме

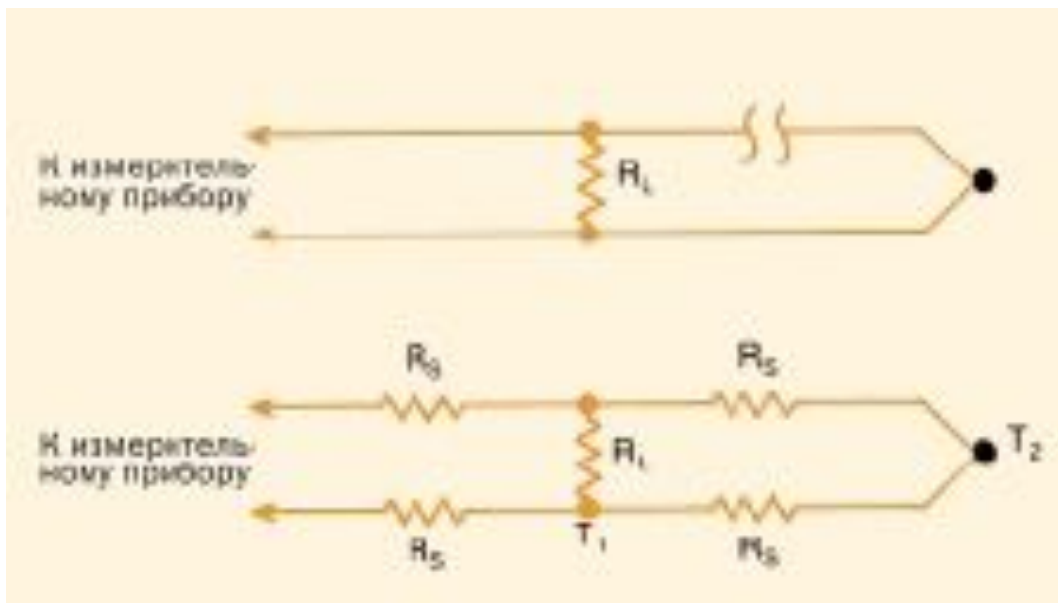




# ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУР

## ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ТЕРМОМЕТРЫ (ТЕРМОПАРЫ)

При высоких температурах электрическое сопротивление материалов изоляционных оболочек термоэлектродов снижается и может стать меньше омического сопротивления  $R_S$  самих электродов. Это эквивалентно включению в цепь термопары шунтирующего резистора  $R_L$  и образованию нового паразитного спая, имеющего температуру  $T_1$  (в отличие от измеряемой  $T_2$ ). Также при высоких температурах, особенно при измерении температуры жидкости, возможно образование (проникновение) электролита внутри термопары и возникновение гальванического эффекта, также приводящего к ошибкам измерения



# ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУР

## *ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ТЕРМОМЕТРЫ (ТЕРМОПАРЫ)*

### **Шумы и помехи**

Поскольку выходной сигнал термопары очень мал, необходимо принимать специальные меры для снижения уровня шумов (и соответственно погрешности измерения).

Кратко остановимся на наиболее важных из них.

1. Соединительные проводники для подключения термопар должны быть изготовлены из материалов с коэффициентом Зеебека, максимально близким к материалам термопары.
2. Необходимо стремиться к максимальному сокращению длины соединительных проводников между термопарой и цифровым измерительным устройством. В случае большого удаления термопары от контроллера следует использовать располагаемые в непосредственной близости от термопар специальные модули нормализации сигналов, превращающие термоЭДС в токовый сигнал (например, 4-20 мА) или непосредственно в цифровой отсчет. Кроме того, эти модули, как правило, обеспечивают гальваническую развязку сигналов и содержат устройства компенсации холодного спая. Дополнительные затраты сторицей окупаются надежностью, точностью и стабильностью работы системы.

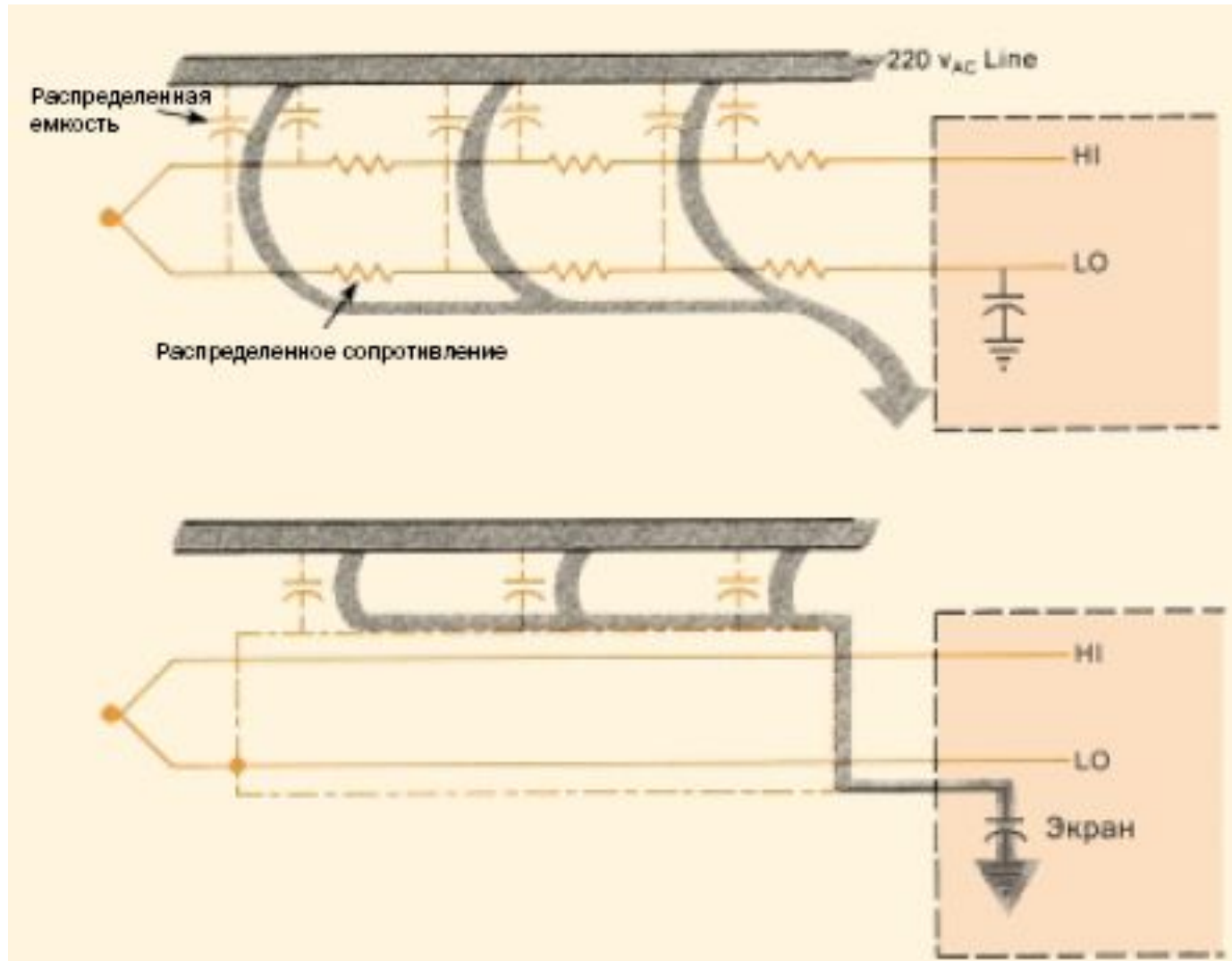
# ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУР

## *ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ТЕРМОМЕТРЫ (ТЕРМОПАРЫ)*

3. Как можно шире использовать экранирование термопар и соединительных проводников для борьбы с помехами общего вида, особенно если проводники проходят рядом с источниками наводок и помех, а также при измерениях в электропроводящих средах.
4. Использовать фильтрацию сигналов для снижения уровня высокочастотных помех. Эффект экранирования термопар и соединительных проводов
5. При многоканальных измерительных системах использовать метод временного отключения не используемых в данный момент групп каналов для предотвращения суммирования их шумов с сигналом измеряемого канала.

# ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУР

## ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ТЕРМОМЕТРЫ (ТЕРМОПАРЫ)



# ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУР

## ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ТЕРМОМЕТРЫ (ТЕРМОПАРЫ)

### МЕТОДЫ ДИСТАНЦИОННОЙ ДИАГНОСТИКИ ИСПРАВНОСТИ ТЕРМОПАР

Наиболее просты и удобны программные методы диагностики, в основе которых лежит протоколирование результатов измерений температуры за некоторый период времени. В частности, поскольку температура в данном технологическом процессе может меняться с конечной скоростью, любое мгновенное изменение показаний термопарного термометра, скорее всего, является признаком ошибки или отказа.

- **Проверка исправности термопары методом закорачивания клемм**

Среди аппаратных методов наибольшее распространение получили метод закорачивания термопары и метод измерения сопротивления термопары. Предположим, что термопара (железо-константан) подключена к измерительному прибору медными проводниками через клеммный соединитель с известной температурой  $T_{REF}$  (как правило, это комнатная температура). В этом случае термоЭДС будет равна:

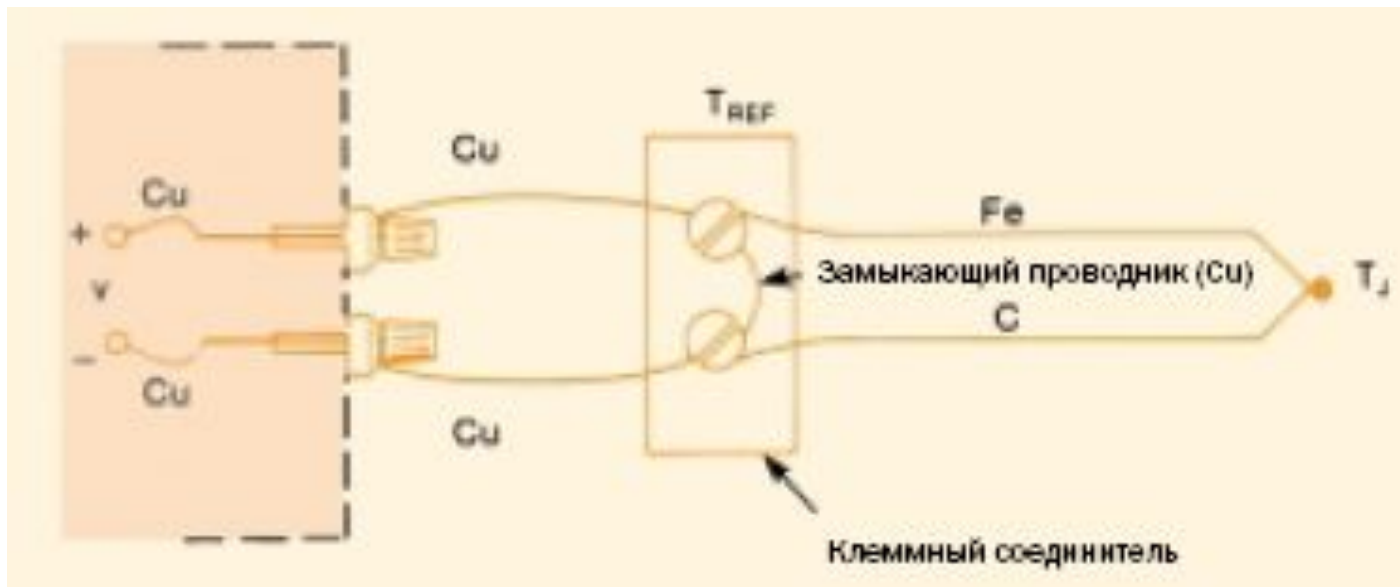
$$E = \alpha(T_j - T_{REF}).$$

Если мы теперь замкнем между собой клеммы медным проводом, то получим:

# ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУР

## ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ТЕРМОМЕТРЫ (ТЕРМОПАРЫ)

- Таким образом, при закороченной термопаре прибор должен показывать температуру клеммного соединителя  $T_{REF}$ . Этот простой тест позволяет проверить правильность работы контроллера, измерительного устройства, устройства компенсации холодного спая, но не самой термопары. Для проверки термопары можно использовать, например, метод контроля ее омического сопротивления. В нормальном состоянии сопротивление плавно меняется с температурой. Если, например, в результате локального нагрева возникнет замыкание термопары, то сопротивление резко изменится, что, скорее всего, указывает на ошибку.

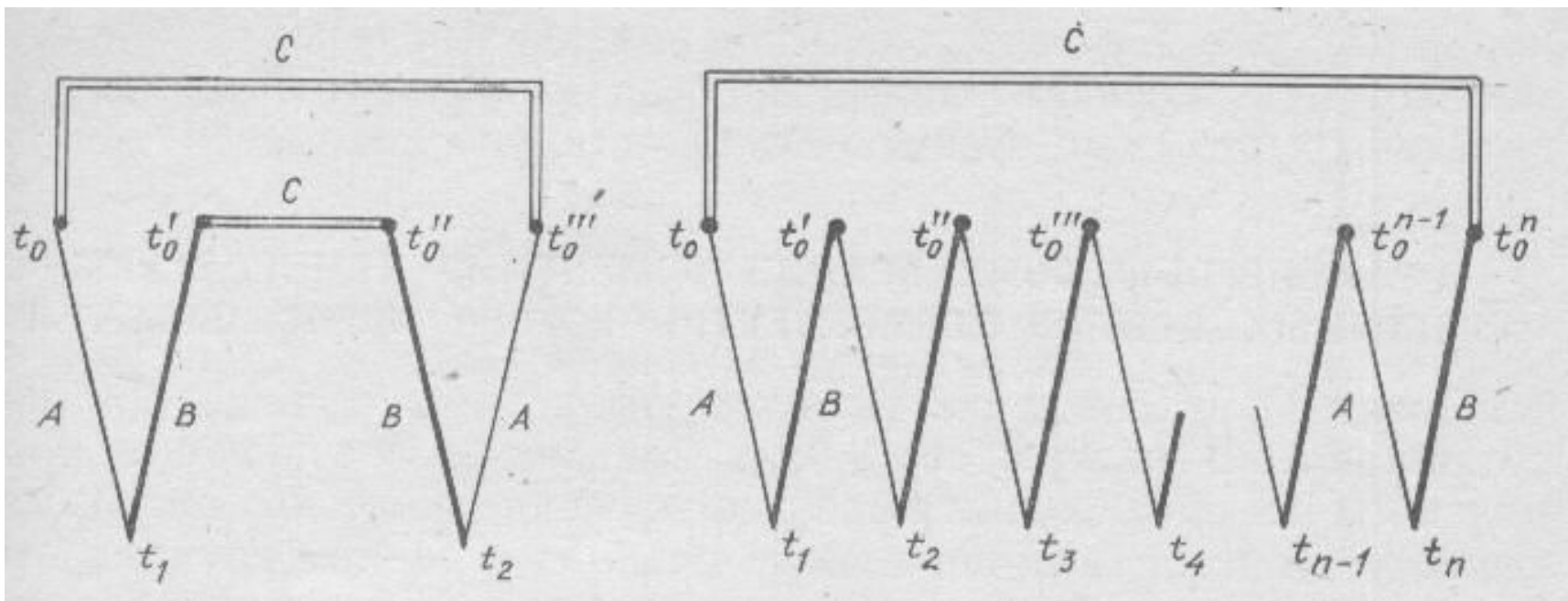


# ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУР

## ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ТЕРМОМЕТРЫ (ТЕРМОПАРЫ)

### ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОЕ И ПАРАЛЛЕЛЬНОЕ СОЕДИНЕНИЕ ТЕРМОПАР

В случаях, когда требуется измерить небольшую разность температур или получить большую термо-ЭДС, применяют дифференциальные ТЭП и термобатареи, представляющие собой несколько последовательно соединенных ТЭП



# ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУР

## ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ТЕРМОМЕТРЫ (ТЕРМОПАРЫ)

Суммарная термо-ЭДС дифференциального ТЭП:

$$e_{ав}(t_1, t_2) = e_{AB}(t_1) + e_{BC}(t_0') + e_{CB}(t_0'') + e_{BA}(t_2) + e_{AC}(t_0''') + e_{CA}(t_0'). \quad (5.11)$$

Если  $t_0 = t_0' = t_0'' = t_0'''$ , то

$$e_{CA}(t_0) + e_{AC}(t_0''') = 0 \text{ и } e_{BC}(t_0') + e_{CB}(t_0'') = 0.$$

Подставив эти выражения в уравнение (5.11), получим

$$e_{ав}(t_1, t_2) = e_{AB}(t_1) - e_{BA}(t_2) \quad (5.12)$$

Для соблюдения условия  $t_0 = t_0' = t_0'' = t_0'''$  свободные концы ТЭП выводят на одну общую панель. Абсолютное значение температуры  $t_0$  **не влияет на показания дифференциального ТЭП.**

Термоэлементы одного и того же типа соединяют в термобатарей последовательно таким образом, что в соединяют всегда разнородные термоэлементы. Термоэлектродвижущая сила термобатареи, состоящей из  $n$  элементов:

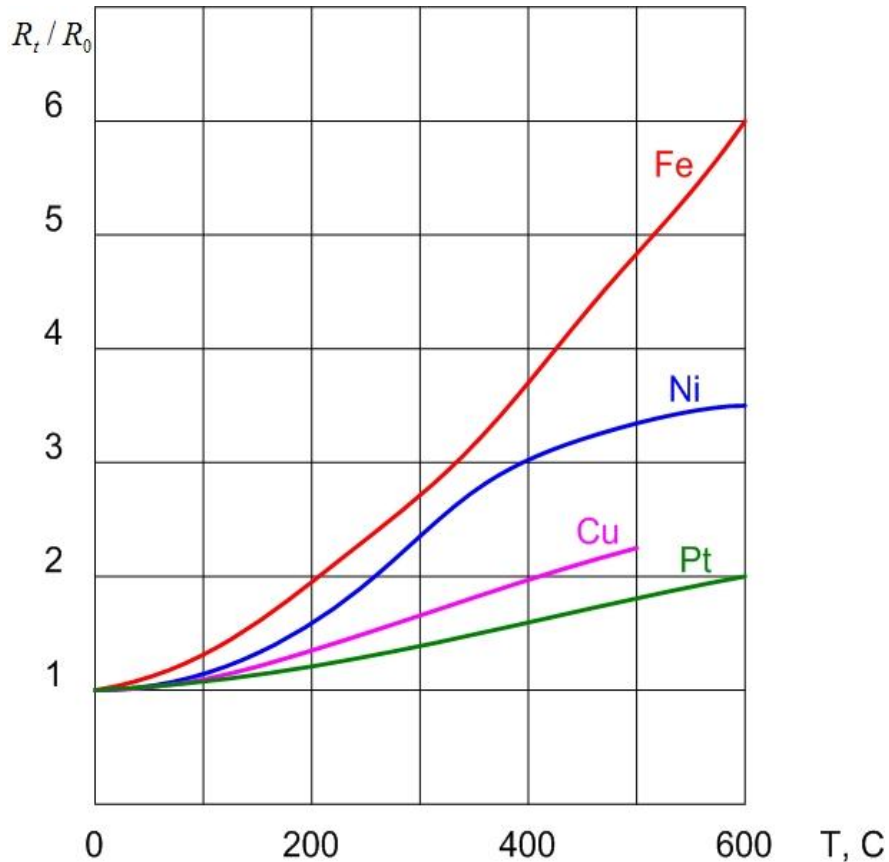
$$E = [e_{AB}(t) - e_{AB}(t_0)]n = nE_{AB}(t, t_0), \quad (5.13)$$

где  $E_{AB}(t, t_0)$ , — термо-ЭДС одного термоэлемента, состоящего из термоэлектродов  $A$  и  $B$  с концами, находящимися при температурах  $t$  и  $t_0$ ;

$n$  — число термоэлементов, соединенных последовательно.



# ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУР ТЕРМОПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ СОПРОТИВЛЕНИЯ



Измерение температуры **термометрами сопротивления** основано на свойстве проводников и полупроводников изменять свое электрическое сопротивление при изменении их температуры. Таким образом, омическое сопротивление проводника или полупроводника представляет некоторую функцию его температуры  $R = f(t)$ . Вид этой функции зависит от природы материала.

Для изготовления чувствительных элементов серийных термометров сопротивления применяют чистые металлы. К металлам предъявляют следующие основные требования.

# ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУР

## ТЕРМОПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ СОПРОТИВЛЕНИЯ

1. Металл не должен окисляться и вступать в химическое взаимодействие с измеряемой средой, должен обладать высокой воспроизводимостью значений электрического сопротивления в интервале рабочих температур.
2. Температурный коэффициент электрического сопротивления металла

$$\alpha = \frac{1}{R} \frac{dR}{dt}$$

должен быть достаточно большим и неизменным. Этот коэффициент принято определять соотношением

$$\alpha_{0...100} = (R_{100} - R_0) / 100R_0,$$

где  $R_0$  и  $R_{100}$  – сопротивление образца данного материала при температуре соответственно 0 и 100 °С. Для большинства чистых металлов  $\alpha \approx 4 \cdot 10^{-3} \text{ 1/}^\circ\text{C}$ .

# ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУР

## ТЕРМОПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ СОПРОТИВЛЕНИЯ

3. Сопротивление должно изменяться с изменением температуры по прямой или плавной кривой без резких отклонений и явлений гистерезиса.
4. Удельное электрическое сопротивление металла должно быть достаточно большим: чем больше удельное сопротивление, тем меньше нужно металла для получения требуемого первоначального сопротивления термометра.

Указанным требованиям в определенных температурных пределах наиболее полно отвечают **платина, медь, никель и железо**.

- **Платина.** Удельное электрическое сопротивление платины  $\rho = 0,1$  Ом·мм<sup>2</sup>/м, а температурный коэффициент электрического сопротивления в диапазоне температур от 0 до 100 °С  $\alpha \approx 3,9 \cdot 10^{-3}$  1/°С.

Изменение сопротивления платины выражается уравнениями: в диапазоне температур от 0 до +650 °С квадратичной параболы, в диапазоне температур от –200 до 0 °С кубической параболы. Характеристики платиновых термометров сопротивления нелинейны, однако отклонение от линейной характеристики не превышает 5 % в интервале температур от 0 до 500 С и 19 % в интервале температур от –200 до 0 °С.

# ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУР

## ТЕРМОПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ СОПРОТИВЛЕНИЯ

- **Медь.** К преимуществам меди следует отнести низкую стоимость, легкость получения ее в чистом виде, сравнительно высокий температурный коэффициент электрического сопротивления  $\alpha \approx 4,26 \cdot 10^{-3} \text{ 1/}^\circ\text{C}$  и линейную зависимость сопротивления от температуры

$$R_t = R_0 (1 + \alpha t).$$

К недостаткам меди относятся малое удельное сопротивление и легкая окисляемость при температуре выше  $100^\circ\text{C}$ .

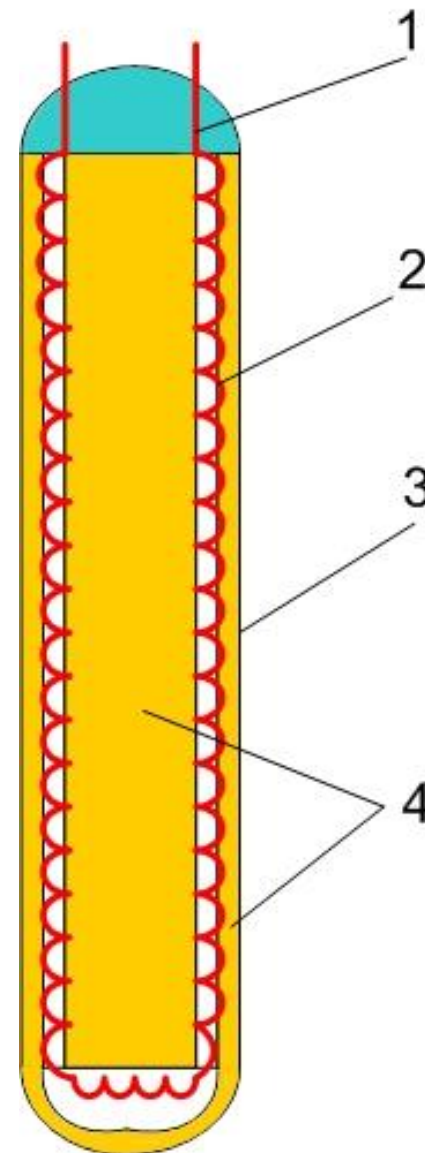
- **Никель и железо.** Эти металлы обладают сравнительно высоким температурным коэффициентом электрического сопротивления и относительно большим удельным сопротивлением. Однако этим металлам присущи и недостатки: никель и железо трудно получить в чистом виде, что усложняет изготовление взаимозаменяемых термометров сопротивления; зависимости сопротивления железа и, особенно, никеля от температуры выражаются кривыми, которые не могут быть записаны в виде простых эмпирических формул; никель и, особенно, железо, легко окисляются даже при сравнительно низких температурах. Эти недостатки ограничивают применение никеля и железа для изготовления термометров сопротивления.

# ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУР

## ТЕРМОПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ СОПРОТИВЛЕНИЯ

**Чувствительный элемент** платинового термометра отечественного производства состоит из двух соединенных последовательно платиновых спиралей 2, расположенных в каналах керамического каркаса 4.

К двум верхним концам этих спиралей припаяны платиновые или иридиевородиевые (60 % родия) выводы 1, к которым приварены выводные проводники, изолированные керамическими бусами. Для крепления платиновых спиралей и выводов в керамическом каркасе используют глазурь (или термоцемент) на основе оксидов алюминия и кремния. Пространство между платиновыми спиральями и стенками каналов каркаса заполнено порошком оксида алюминия, который служит изолятором и улучшает тепловой контакт между спиральями и каркасом. Снаружи устройство



# **ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУР**

## ***ТЕРМОПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ СОПРОТИВЛЕНИЯ***



# ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУР

## ТЕРМОПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ СОПРОТИВЛЕНИЯ

- Для изготовления термометров сопротивления применяют также полупроводники (окислы некоторых металлов). Существенным преимуществом полупроводников является большой температурный коэффициент электрического сопротивления (от  $3 \cdot 10^{-2}$  до  $4 \cdot 10^{-2}$   $1/^\circ\text{C}$ ). Вследствие большого удельного электрического сопротивления полупроводников из них можно изготавливать термометры малых размеров с большим начальным сопротивлением, что позволяет не учитывать сопротивление соединительных проводов и других элементов электрической измерительной схемы термометра.
- В узком температурном интервале зависимость электрического сопротивления полупроводникового резистора от температуры выражается уравнением
$$R = A \exp (B/T) \text{ или } \ln R = \ln A + B/T,$$
где  $A$  и  $B$  — постоянные коэффициенты, зависящие от физических свойств материала (полупроводника);  $T$  — абсолютная температура терморезистора.
- Основным препятствием, ограничивающим широкое внедрение полупроводниковых терморезисторов в промышленность, является плохая воспроизводимость параметров, что исключает их взаимозаменяемость, а

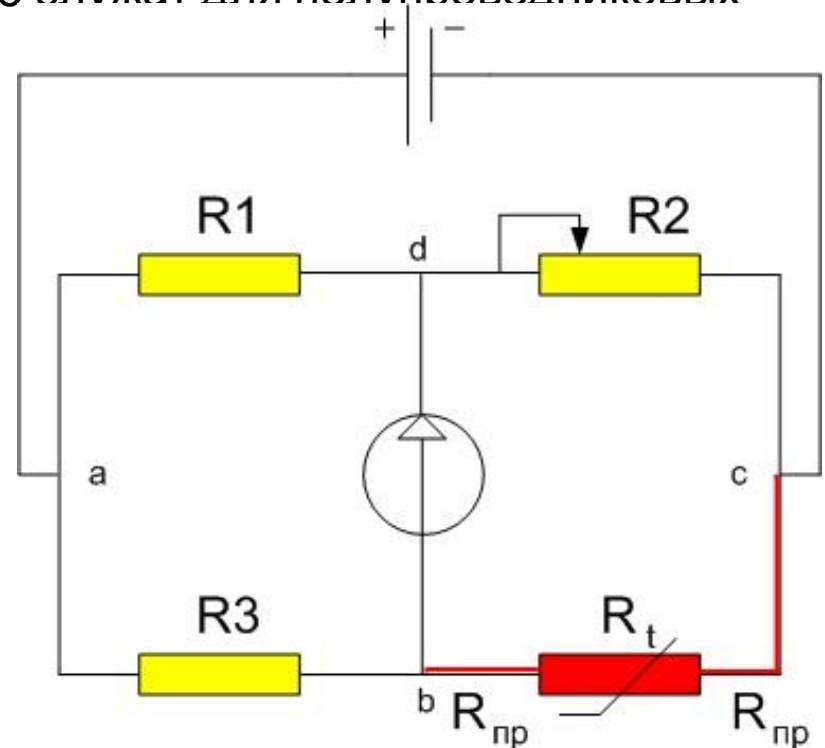
# ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУР ТЕРМОПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ СОПРОТИВЛЕНИЯ

## ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ ТЕРМОМЕТРОВ СОПРОТИВЛЕНИЯ

В качестве измерительных приборов термометров сопротивления применяют:

- **уравновешенные мосты;**
- **логометры (омметры);**
- **неуравновешенные мосты** (обычно служат для полупроводниковых терморезисторов).

Схема уравновешенного моста





# ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУР ТЕРМОПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ СОПРОТИВЛЕНИЯ

- При равновесии моста, которое достигается перемещением движка по резистору  $R_2$ , сила тока в диагонали моста равна 0. В этом случае потенциалы на вершинах моста  $b$  и  $d$  равны, ток от источника питания разветвляется на две ветви, падение напряжения на резисторах  $R_1$  и  $R_3$  одинаковое, т. е.

$$R_1 I_1 = R_3 I_3 \quad (5.14)$$

здесь и далее  $R_t$  — сопротивление резистора  $R_i$  (где  $i = 1, 2, \dots$ ). Падение напряжения на плечах моста  $bc$  и  $cd$  также одинаковое, т. е.

$$R_2 I_2 = (R_t + 2R_{пр}) I_t \quad (5.15)$$

Разделив равенство (5.14) на (5.15), получим

$$\frac{R_1 I_1}{R_2 I_2} = \frac{R_3 I_3}{I_t (R_t + 2R_{пр})} \quad (5.16)$$

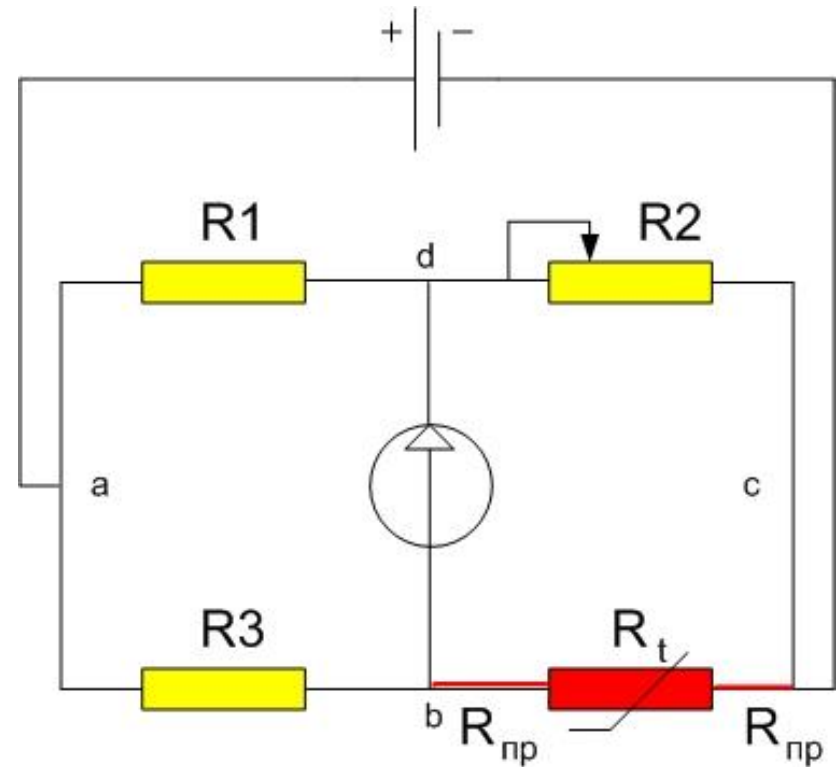
При соблюдении условия равновесия моста уравнение (5.16) примет вид

$$R_t = R_2 \frac{R_3}{R_1} - 2R_{пр}.$$

# ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУР ТЕРМОПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ СОПРОТИВЛЕНИЯ

В случаях, когда колебания температуры среды, окружающей соединительные провода, значительны и погрешность при измерении может превысить допустимую величину, применяют трехпроводную систему подключения, которая состоит в том, что одну из вершин моста переносят непосредственно к головке термометра.

При таком присоединении сопротивление одного провода  $R_{np}$  прибавляется к сопротивлению  $R_1$ , а сопротивление второго провода — к сопротивлению  $R_2$ .



# ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУР ТЕРМОПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ СОПРОТИВЛЕНИЯ

Уравнение равновесия моста принимает вид

$$R_t + R_{пр} = (R_2 + R_{пр}) \frac{R_3}{R_1} \quad (5.31.7)$$

При изменении сопротивления проводов в случае симметричного моста, когда  $R_1 = R_3$  получим  $R_t + R_{пр} = R_2 + R_{пр}$ , т. е. изменение сопротивлений соединительных проводов не влияет на результаты измерения.

Как правило, к блокам УСО как отечественных, так и зарубежных микропроцессорных систем подключают только стандартизованные термометры сопротивления – платиновые и медные по ГОСТ 6651—78. Отечественные микропроцессоры допускают подключение по трехпроводной схеме (рассмотрена выше). Для модулей АЦП УСО применяют и четырехпроводную схему подключения датчиков со стабилизатором тока

# **ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУР**

## ***ТЕРМОПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ СОПРОТИВЛЕНИЯ***



# **ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУР**

## ***ТЕРМОПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ СОПРОТИВЛЕНИЯ***



# ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУР ТЕРМОПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ СОПРОТИВЛЕНИЯ

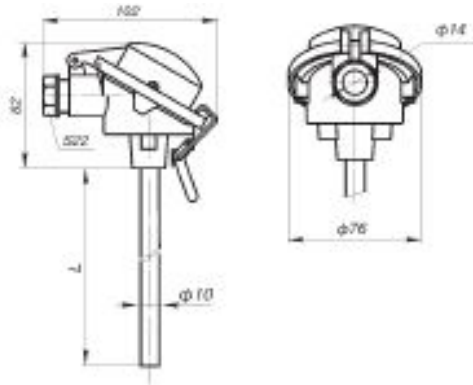


Рис. 1.  
ТСП/ТСМ-1293.

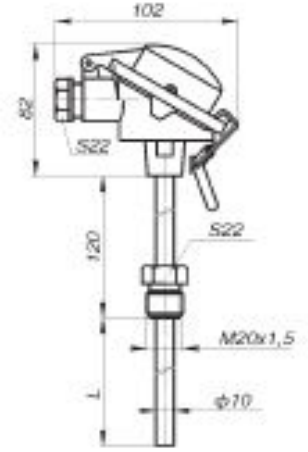
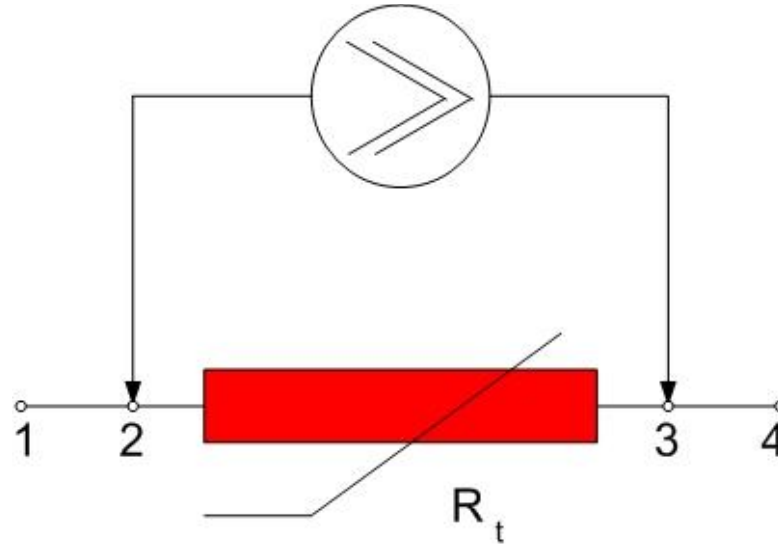


Рис. 2.  
ТСП/ТСМ-1293-01,  
остальное - см. рис. 1.

Схемы соединений внутренних проводников датчиков с чувствительным элементом (ЧЭ) по ГОСТ 6651

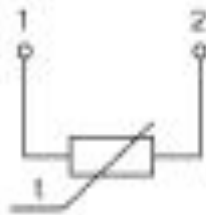


Схема 2

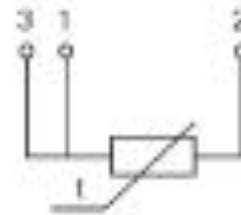


Схема 3

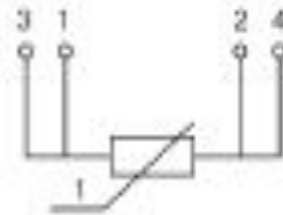


Схема 4

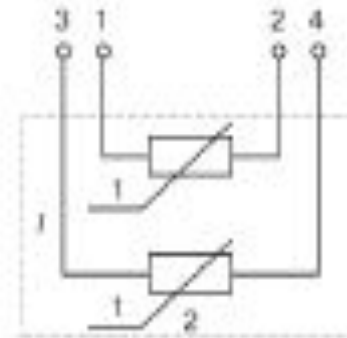


Схема 2x2 - "двойной ЧЭ"  
(два ЧЭ в одном корпусе)

# ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУР ТЕРМОПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ СОПРОТИВЛЕНИЯ

## Классы допуска термопреобразователей сопротивления

1. Термопреобразователи сопротивления изготавливаются с номинальной статической характеристикой преобразования (НСХ) и допускаемым отклонением сопротивления при  $t_C$  ( $R_0$ ) от номинального значения по ГОСТ 6651.

Условное обозначение НСХ по ГОСТ 6651		Класс допуска	Nom. значения сопротивления при $t_C$ , $R_0$ , Ом	Допускаемое отклонения от номинального значения сопротивления при $t_C$	
в странах СНГ	международное			$\pm\%$	$\pm$ Ом
50П	Pt50	А	50	0,05	0,025
100П, 100М	Pt100, Cu100		100		0,05
50П, 50М	Pt50, Cu50	В	50	0,1	0,1
100П, 100М	Pt100, Cu100		100		
50П, 50М	Pt50, Cu50	С	50	0,2	0,2
100П, 100М	Pt100, Cu100		100		

# ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУР ТЕРМОПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ СОПРОТИВЛЕНИЯ

2. Значение  $W_{100}$  определяется как отношение сопротивления термopреобразователя сопротивления при 100°C ( $R_{100}$ ) к сопротивлению термopреобразователя при 0°C ( $R_0$ ), по ГОСТ 6651.

Тип термopреобразователя сопротивления	Класс допуска	В странах СНГ		Международная	
		номинальное значение $W_{100}$	наименьшее допустимое значение $W_{100}$	номинальное значение $W_{100}$	наименьшее допустимое значение $W_{100}$
ТСП	А	1,3910	1,3905	1,3850	1,3845
	В		1,3900		1,3840
	С		1,3895		1,3835
ТСМ	В	1,4280	1,4270	1,4260	1,4250
	С		1,4260		1,4240



# ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУР ПИРОМЕТРЫ

## ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ БЕСКОНТАКТНЫМ СПОСОБОМ

**Принцип действия пирометров излучения** основан на использовании того или иного свойства теплового излучения нагретых тел.

По сравнению с приборами, основанными на других методах измерения температуры, пирометры излучения имеют следующие **преимущества**:

- измерение основано на бесконтактном способе, следовательно, отсутствует искажение температурного поля, вызванное введением преобразовательного элемента прибора в измеряемую среду;
- верхний предел измерения температуры теоретически не ограничен;
- имеется возможность измерения температур пламени и высоких температур газовых потоков при больших скоростях, когда трудно использовать другие методы.

Методы пирометрии в зависимости от характера спектра излучения объекта разделяются на две основные группы:

1. Для тел со сплошным спектром излучения.
2. Для тел с линейчатым спектром излучения.

# ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУР ПИРОМЕТРЫ

## ОСНОВНЫЕ МЕТОДЫ ПИРОМЕТРИИ ДЛЯ ТЕЛ СО СПЛОШНЫМ СПЕКТРОМ

Свойство спектра излучения объекта <sup>ИЗЛУЧЕНИЯ</sup>	Наименование средств измерений
Интегральная плотность излучения, описываемая для АЧТ законом <b>Стефана-Больцмана</b>	Пирометр <b>полного</b> излучения (радиационный пирометр)
Спектральная плотность излучения в ограниченном интервале длин волн	Пирометр <b>частичного</b> излучения
Спектральная плотность излучения в узком интервале, позволяющем применить закон <b>Планка</b>	<b>Квазимонохроматический</b> (яркостный или оптический) пирометр
Отношение плотности спектрального излучения в <b>двух</b> спектральных интервалах	Пирометр <b>спектрального отношения</b> (цветовой пирометр)
Отношение плотности спектрального излучения в <b>трех</b> и более спектральных интервалах	Пирометр <b>спектрального отношения</b>

# ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУР ПИРОМЕТРЫ

Возрастание **спектральной плотности излучения** с повышением температуры различно для волн разных длин и в области сравнительно невысоких температур для абсолютно черного тела описывается **уравнением Вина**:

$$E_{0\lambda} = C_1 \lambda^{-5} \exp\left(-\frac{C_2}{\lambda T}\right) \quad (5.20)$$

где  $E_{0\lambda}$  - спектральная плотность излучения абсолютно черного тела для волны длиной  $\lambda$ ;  $T$  — абсолютная температура тела, К;  $C_1$  и  $C_2$  — константы излучения, числовые значения которых зависят от принятой системы единиц.

Уравнение Вина применяют в пирометрии для волны определенной длины (обычно для красного цвета длиной волны 0,65 или 0,66 мкм). Уравнением Вина можно пользоваться до температуры примерно 3000 К.

При более высоких температурах СЭЯ абсолютно черного тела описывается **уравнением Планка**:

$$E_{0\lambda} = \frac{C_1 \lambda^{-5}}{\exp\left(\frac{C_2}{\lambda T} - 1\right)} \quad (5.21)$$

# ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУР ПИРОМЕТРЫ

Спектральное распределение энергии излучения происходит согласно закону смещения Вина:

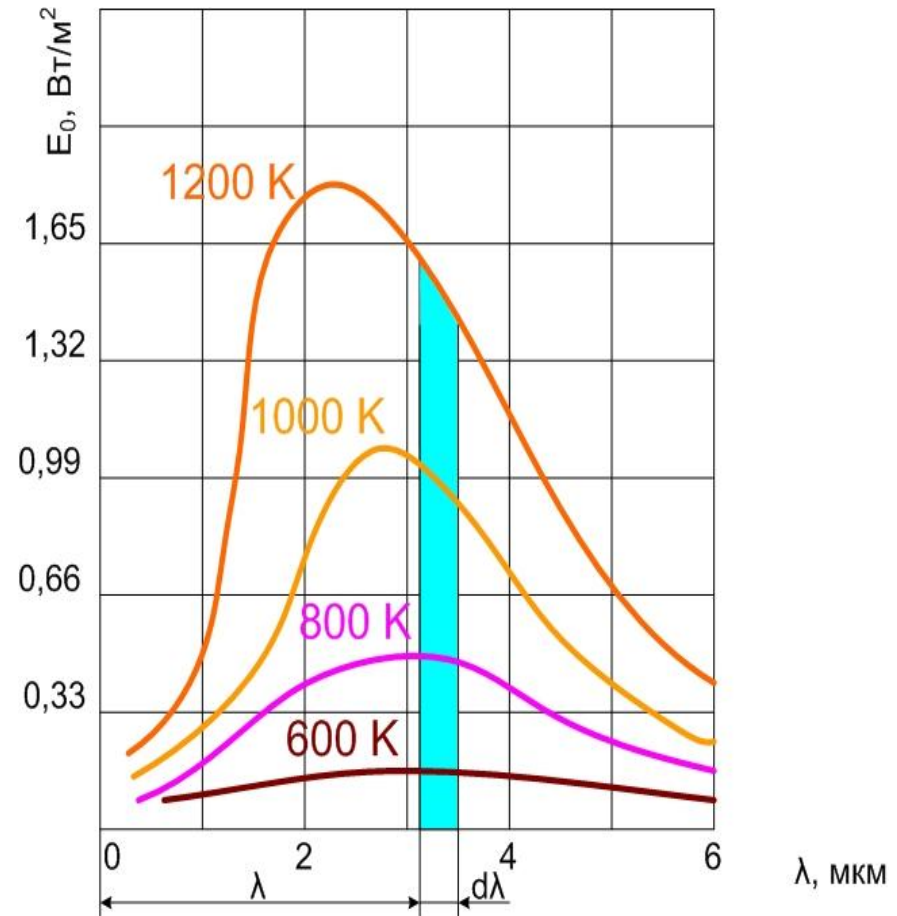
$$\lambda_{\max} T = b,$$

где  $\lambda_{\max}$  — длина волны, соответствующая максимальному излучению при данной температуре  $T$ ;

$b = 2896 \text{ мкм}\cdot\text{К}$  — постоянная.

*Пользуясь законом смещения Вина, по положению максимума можно определить абсолютную температуру тела.*

*Этот метод использован в пирометрах спектрального отношения (цветовых).*



# ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУР ПИРОМЕТРЫ

Под **цветовой температурой** понимают температуру абсолютно черного тела, при которой отношение энергетических яркостей при двух длинах волн  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  равно отношению соответствующих спектральных плотностей излучения физического тела.

Согласно определению цветовой температуры должно соблюдаться равенство

$$\frac{E_{0\lambda_1(T_u)}}{E_{0\lambda_2(T_u)}} = \frac{E_{0\lambda_1(T)}}{E_{0\lambda_2(T)}}. \quad (5.22)$$

Используя уравнения (5.21) и (5.22) с учетом, что, можно получить соотношение между цветовой температурой  $T_u$  реального тела и его истинной температурой  $T$ :

$$\frac{T}{T_u} = \frac{1}{C_2 \left( \frac{1}{\lambda_2} - \frac{1}{\lambda_1} \right)} \ln(\varepsilon_{\lambda_1} / \varepsilon_{\lambda_2}), \quad (5.23)$$

где  $\varepsilon_{\lambda_1}$  и  $\varepsilon_{\lambda_2}$  — степень черноты физического тела для лучей с длиной волны соответственно  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$ .

# ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУР ПИРОМЕТРЫ

Из уравнения (5.23) видно, что для абсолютно черных тел, у которых  $\varepsilon_{\lambda_1} = \varepsilon_{\lambda_2} = 1$ , а также для реальных тел, у которых монохроматические коэффициенты черноты  $\varepsilon_{\lambda_1}$  и  $\varepsilon_{\lambda_2}$ , измеренные при длинах волн  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$ , равны, цветовая температура совпадает с их истинной температурой. Для тел, у которых  $\varepsilon_{\lambda}$  возрастает с ростом длины волны, цветовая температура меньше истинной. Для тел, у которых  $\varepsilon_{\lambda}$  убывает с ростом длины волны, цветовая температура больше истинной.

Интегральное излучение абсолютно черного тела описывается **уравнением Стефана—Больцмана**:

$$E_0 = C_0 \left( \frac{T}{100} \right)^4, \quad (5.24)$$

где  $C_0$  — константа излучения абсолютно черного тела;  $T$  — абсолютная температура излучающей поверхности, К.

Условная температура реального тела, измеренная пирометром полного излучения, численно равна температуре абсолютно черного тела, при которой интегральные излучения обоих тел одинаковы.

# ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУР ПИРОМЕТРЫ

**Интегральное излучение реального тела**, нагретого до температуры  $T$ :  
(5.25)

$$E = \varepsilon C_0 (T/100)^4$$

где  $\varepsilon = E/E_0$  — степень черноты тела для всех длин волн.

**Интегральное излучение абсолютно черного тела** при совпадении его температуры с  $T_y$  (условная температура, измеренная пирометром полного излучения)

$$E_0 = C_0 (T_y/100)^4. \quad (5.26)$$

Сравнив правые части уравнений (5.25) и (5.26) с учетом, что  $E = E_0$ , получим формулу для определения **действительной температуры реального тела**  
(5.27)

где  $T_y$  — **условная температура**, измеренная пирометром полного излучения.

Для всех реальных физических тел  $0 < \varepsilon < 1$ , поэтому температура тела, измеренная пирометром излучения, всегда меньше его истинной температуры.

# ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУР ПИРОМЕТРЫ

Если сравнить  $E_\lambda$  реального (серого) тела при определенной длине волны  $\lambda$  с  $E_{0\lambda}$  абсолютно черного тела при той же длине волны, то их отношение будет выражать **степень черноты тела** при определенной длине волны:

$$\varepsilon_\lambda = E_\lambda / E_{0\lambda} \quad (5.28)$$

Абсолютно черное тело при яркостной (условной) температуре  $T_\text{я}$  и длине волны  $\lambda$  имеет спектральную плотность излучения  $E_{0\lambda}$ . Такую же спектральную плотность при той же длине волны  $\lambda$ , имеет реальное тело при температуре  $T$ , т. е.  $E_{\lambda(T)} = E_{0\lambda(T_\text{я})}$ .

Яркость реального тела, нагретого до температуры  $T$ , при данной длине волны согласно уравнениям (5.20) и (5.28)

$$E_{\lambda(T)} = k\varepsilon_\lambda C_1 \lambda^{-5} \exp(-C_2/\lambda T) \quad (5.29)$$

Яркость абсолютно черного тела, нагретого до температуры  $T_\text{я}$ :

$$E_{0\lambda(T_\text{я})} = kC_1 \lambda^{-5} \exp(-C_2/\lambda T_\text{я}) \quad (5.30)$$



# ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУР ПИРОМЕТРЫ

Сравнив правые части уравнений (5.29) и (5.30), после логарифмирования получим уравнение для вычисления **ИСТИННОЙ температуры  $T$  физического тела** по яркостной (условной) температуре  $T_{я}$ , измеренной квазимонохроматическим пирометром:

$$T = \left( \frac{1}{T_{я}} - \frac{\lambda}{C_2} \ln \frac{1}{\varepsilon_{\lambda}} \right)^{-1}, \quad (5.31)$$

где  $T_{я}$  — яркостная (условная) температура тела, измеренная пирометром, К;  $\lambda$  — длина волны, мкм;  $C_2$  — константа уравнения Вина;  $\varepsilon_{\lambda}$  — степень черноты тела для данной длины волны.

# ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУР

## ПИРОМЕТРЫ

### КВАЗИМОНОХРОМАТИЧЕСКИЕ ПИРОМЕТРЫ

**Пирометр** представляет собой телескопическую трубку с линзой объектива и линзой окуляра. Внутри телескопической трубки в фокусе линзы объектива находится лампа накаливания с подковообразной нитью.

Для получения монохроматического света окуляр снабжен красным светофильтром, пропускающим только лучи определенной длины волны. Предел измерения повышают введением серого светофильтра, который в одинаковой степени поглощает энергию волн всех длин. Стекло серого светофильтра выбирают такой оптической плотности, чтобы при яркостной температуре излучателя выше  $1400\text{ }^{\circ}\text{C}$  нить лампы накаливания нагревалась до яркостных температур не выше  $1400\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

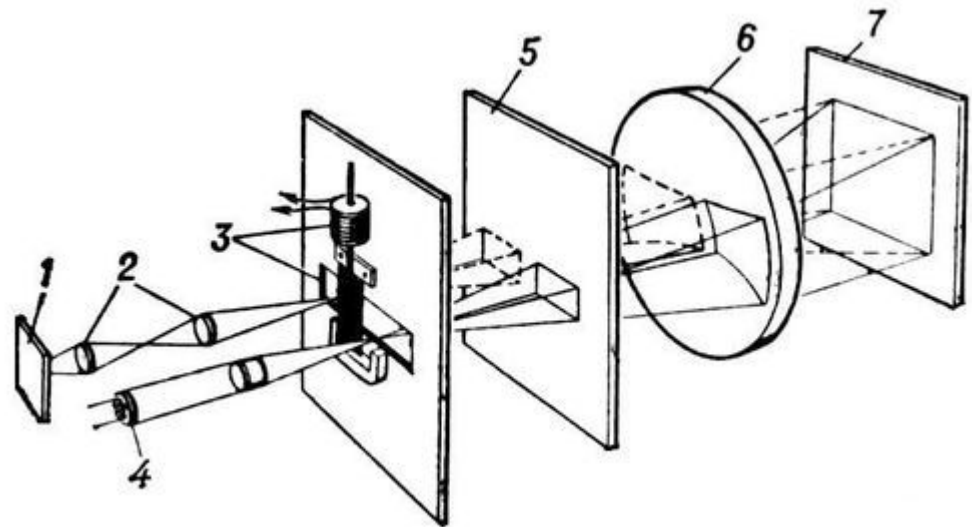
# ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУР

## ПИРОМЕТРЫ

В отличие от пирометров с исчезающей нитью **фотоэлектрические пирометры** позволяют записывать показания и передавать их на расстояние, Эти приборы можно применять для измерения температуры при быстро протекающих процессах.

**Принцип действия** фотоэлектрического пирометра основан на свойстве фотоэлемента изменять фототок в зависимости от интенсивности падающего на него светового потока. В фотоэлектрических пирометрах используется тот же участок спектра (средняя длина волны 0,65 мкм), что и в пирометрах с исчезающей нитью. Вследствие этого **температура, показываемая фотоэлектрическим пирометром, совпадает с яркостной температурой, измеренной квазимонохроматическим пирометром.**

- 1 — источник излучения;
- 2 — линзы оптической системы;
- 3 — модулятор, попеременно пропускающий излучение источника и эталонной лампы 4 к фотоэлементу 7;
- 5 — фильтр с узкой частотной полосой пропускания;
- 6 — погнутая линза.



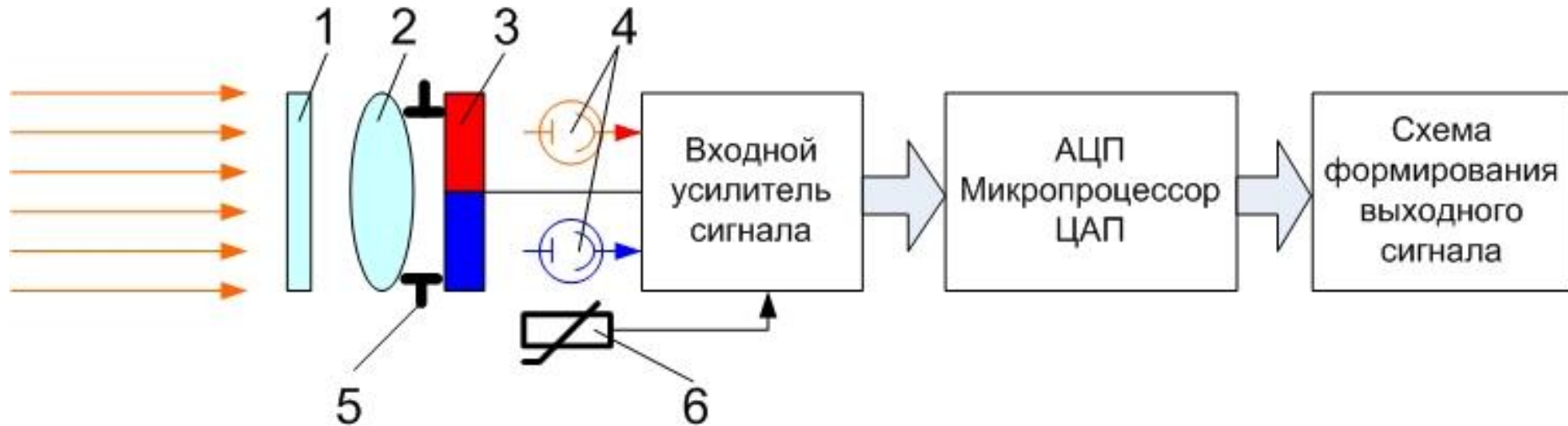
# ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУР

## *ПИРОМЕТРЫ*



# ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУР ПИРОМЕТРЫ

## ПИРОМЕТРЫ СПЕКТРАЛЬНОГО ОТНОШЕНИЯ (ЦВЕТОВЫЕ)



Измеряемое излучение через защитное стекло 1 и объектив 2 с системой диафрагм 5 попадает на оптический фильтр 3, разделяющий поток излучения на два оптических канала с соответствующей длиной волны. Фотоприемное устройство состоит из фотоприемников 4 и датчика его температуры 6. Фотоприемник преобразует излучение в электрический сигнал. Датчик позволяет устранить влияние температуры окружающей среды на характеристики фотоприемника.

# ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУР

## *ПИРОМЕТРЫ*

**Фотоприемником** может служить фотодиод из кремния, сплава индия, галлия и мышьяка либо термобатарей.

Входной усилитель усиливает сигнал фотоприемника до уровня, достаточного для работы АЦП. После преобразования сигнала в цифровой код микропроцессором вычисляется температура объекта. Вносится компенсация на температуру окружающей среды. Пользователь имеет возможность корректировать степень черноты объекта измерения.

Далее ЦАП преобразует полученное значение температуры в аналоговый выходной сигнал.

# ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУР



# ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУР

## ПИРОМЕТРЫ



Стационарный технологический пирометр спектрального отношения с микропроцессорным управлением. Незаменим при измерении температуры объектов с неизвестной излучательной способностью и объектов небольшого размера. Выполнен в ударопрочном корпусе. Имеет цифровой дисплей и аналоговый токовый сигнальный выход. Ориентирован на работу в условиях непрерывного производства. Не чувствителен к сильным электромагнитным полям. Характеризуется высокой точностью и воспроизводимостью результатов. Прост в эксплуатации.

Диапазон измеряемых температур, °С	600...1800
Рабочие длины волн, мкм	0,8 и 1,0
Относительная основная погрешность, % от измеряемой температуры, не более	1
Ток аналогового сигнального выхода	0...20
Время измерения, не более, с	0,33
Диапазон / шаг установки коэффициента коррекции	0,10...2,50 / 0,01
Показатель визирования	80:1*
Ток аналогового сигнального выхода, мА, не более	20
Нагрузка сигнального выхода, Ом, не более	500
Напряжение питания	24В (постоянный ток)
Габаритные размеры, мм	Ø 119x280
Масса, кг	1.4



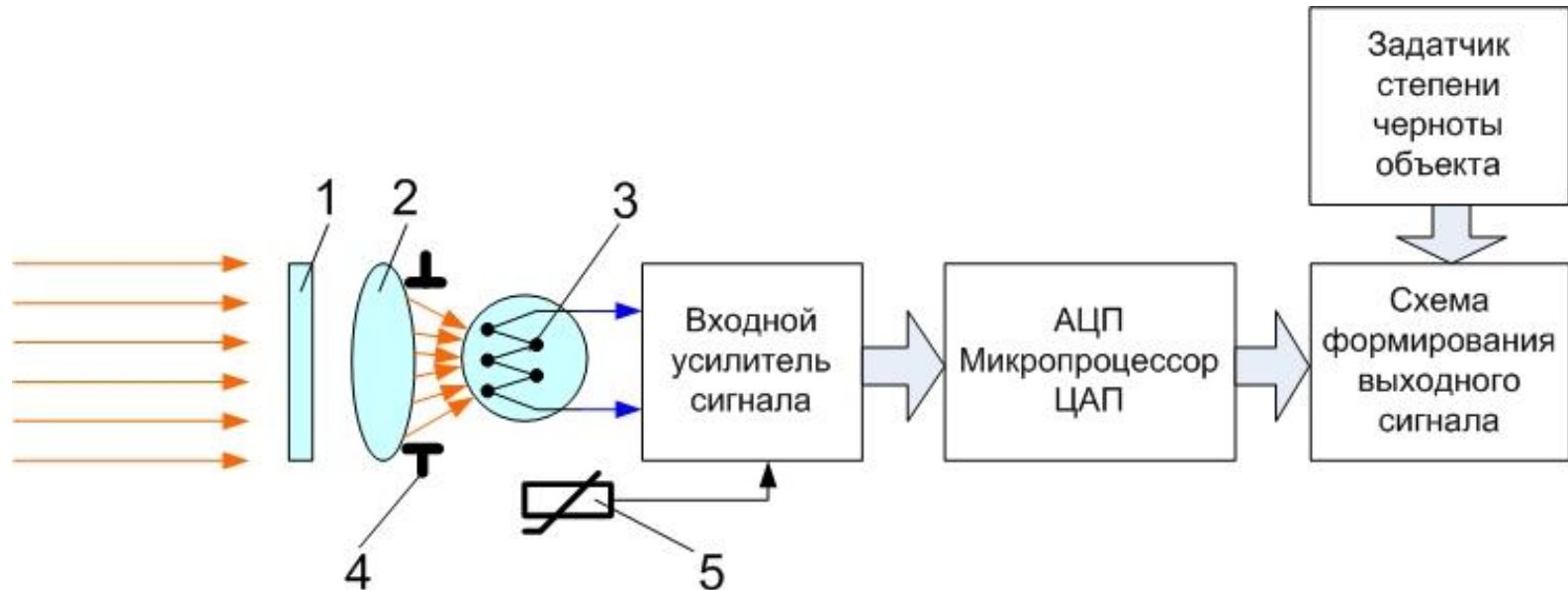
# ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУР ПИРОМЕТРЫ

## ПИРОМЕТРЫ ПОЛНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Пирометры полного излучения измеряют температуру по мощности излучения нагретого тела. Пирометр снабжен оптической системой, собирающей испускаемые нагретым телом лучи на каком-либо теплоприемнике.

Теплоприемник обычно состоит из миниатюрной термоэлектрической батареи (из нескольких малоинерционных последовательно соединенных ТЭП), термометра сопротивления или полупроводникового терморезистора.

Пирометрами полного излучения, у которых в качестве тепловоспринимающего элемента используют термометры сопротивления, можно измерять сравнительно низкие температуры, например от 20 до 100 °С.



# ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУР



# ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУР ПИРОМЕТРЫ

## ПИРОМЕТРЫ ЧАСТИЧНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

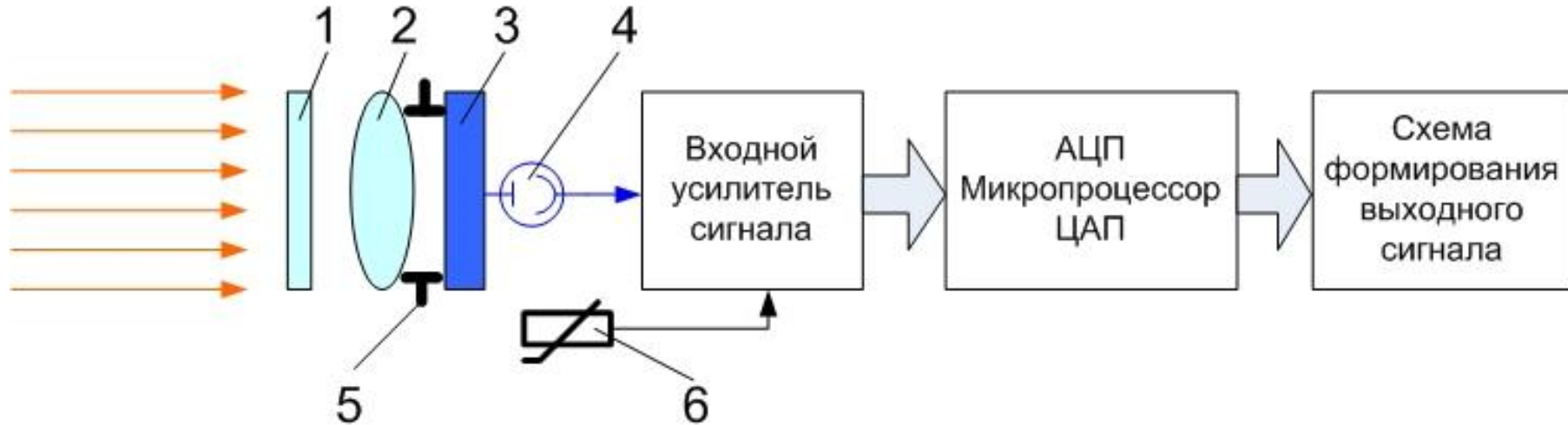
**Пирометры частичного излучения** воспринимают тепловое излучение в ограниченной части спектра (более узкой, чем у пирометров полного излучения).

Теоретического закона, связывающего энергию частичного излучения с температурой тела, не существует, поэтому теоретической связи между показаниями пирометров частичного излучения и действительной температурой нет.

В силу этого для измерения действительной температуры такие пирометры следует градуировать индивидуально.

# ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУР ПИРОМЕТРЫ

## ПИРОМЕТРЫ ЧАСТИЧНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ



Измеряемое излучение через защитное стекло 1 и объектив 2 с системой диафрагм 5 попадает на оптический фильтр 3. Фотоприемное устройство состоит из фотоприемника 4 и датчика его температуры 6. Фотоприемник преобразует излучение в электрический сигнал. Датчик позволяет устранить влияние температуры окружающей среды на характеристики фотоприемника.

# ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУР



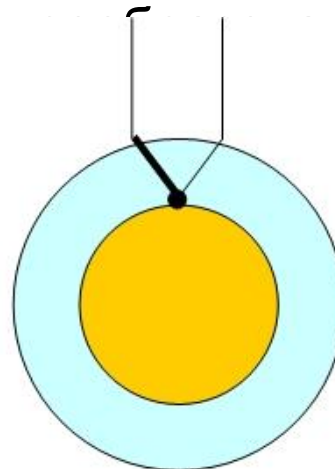
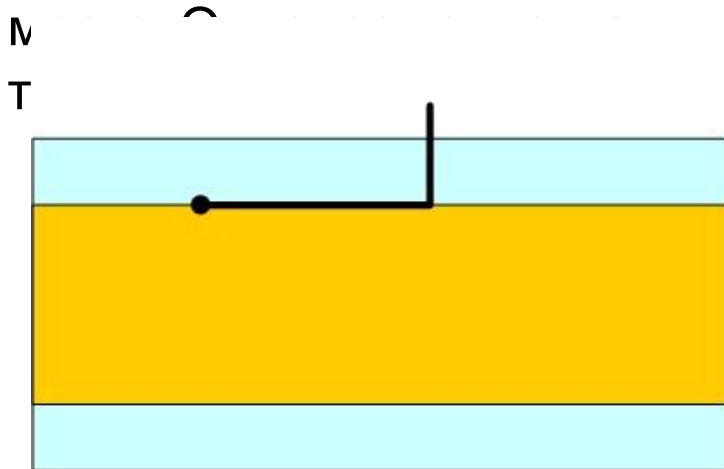
# ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУР

## ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ТВЕРДЫХ ТЕЛ И ПОВЕРХНОСТЕЙ

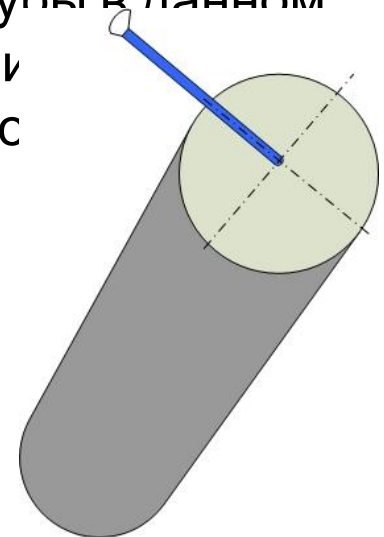
Если объем тела достаточно велик и возможно погружение термопреобразователя (термоэлектрического преобразователя, термометра сопротивления и т. п.) на достаточную глубину, то вполне обеспечивается тепловое равновесие между измеряемым телом и термопреобразователем.

Большие трудности возникают при измерении температуры твердых тел небольшого объема, особенно если в них имеются значительные температурные перепады.

Применяемые в этом случае термопреобразователи должны иметь малые размеры, чтобы обеспечить измерение температуры в данном



элемент и в  
тепловс



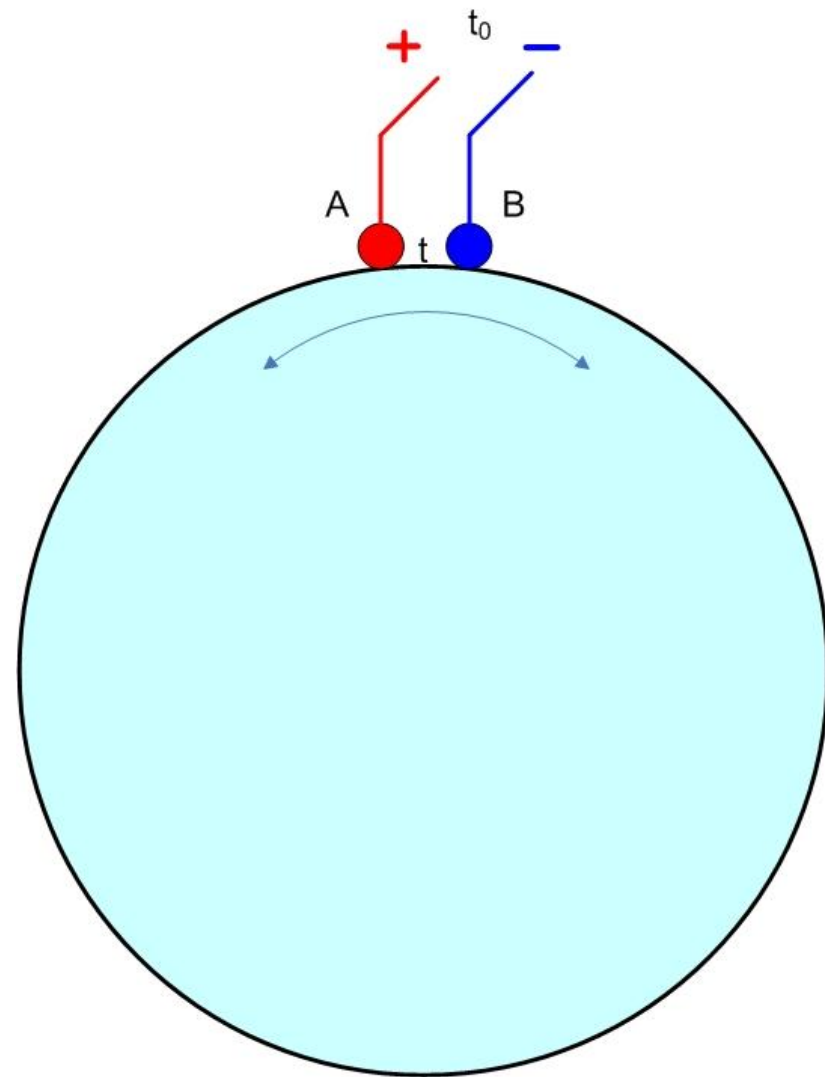
# ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУР

## ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ПОВЕРХНОСТЕЙ

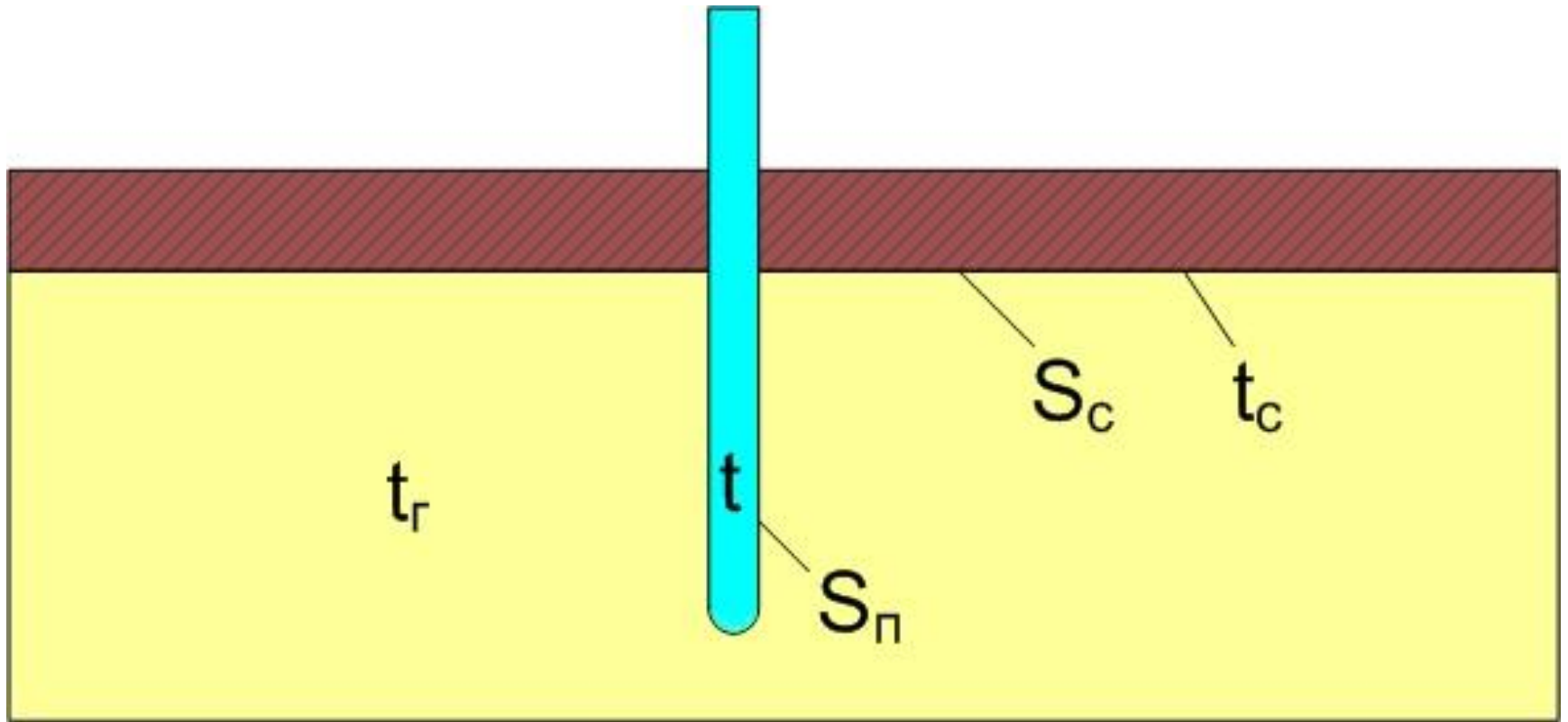
Наиболее сложно измерение температуры **движущихся поверхностей** (к примеру, температуры внешнего металлического кожуха вращающейся печи).

В этом случае при измерениях контактным способом возникают дополнительные погрешности, связанные с трением термодатчика о поверхность, температуру которой измеряют.

Эти погрешности зависят от правильности контакта термодатчика, чистоты контролируемой поверхности и других факторов. При измерении температуры движущихся поверхностей термометр быстро изнашивается.



# ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУР



Пусть температура газа не равна температуре стенки трубы (например,  $t_g > t_c$ ), а температура защитной трубки в нижней части  $t > t_c$ .



# ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУР

## ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУР ГАЗОВЫХ ПОТОКОВ И ПЛАМЕНИ

Измерение температуры почти всегда сопровождается теплообменом между термопреобразователем и окружающими его телами. Рассмотрим случай, когда чувствительный элемент термопреобразователя находится в защитной трубке

Тогда количество теплоты, полученной поверхностью защитной трубки от газа в результате конвективного теплообмена в единицу времени:

$$Q = \alpha s_n (t_r - t),$$

(5.32)

где  $\alpha$  — коэффициент теплоотдачи от газа к защитной трубке термопреобразователя;

$s_n$  — площадь поверхности погруженной части термопреобразователя длиной  $l$ .

Количество теплоты, отдаваемой в единицу времени поверхностью защитной трубки путем лучистого теплообмена с внутренней поверхностью  $s_c$  стенки трубы, может быть выражено уравнением:

$$Q_{л} = \varepsilon_{пр} C_0 s_c \left[ \left( \frac{T}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_c}{5.230} \right)^4 \right];$$

# ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУР

## ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУР ГАЗОВЫХ ПОТОКОВ И ПЛАМЕНИ

Поверхность  $s_n$  очень мала по сравнению с поверхностью  $s_c$ , поэтому отношение  $s_n/s_c$  можно принять равным нулю; тогда  $\varepsilon_{пр} \approx \varepsilon$ , а уравнение принимает вид:

$$Q_{л} = \varepsilon C_0 s_c \left[ \left( \frac{T}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_c}{100} \right)^4 \right]. \quad (5.34)$$

Разность  $t_r - t$  и составляет ошибку измерения, связанную с лучистым теплообменом между термопреобразователем и стенками трубы.

$$t_r - t = \frac{C_0 \varepsilon}{\alpha} \left[ \left( \frac{T}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_c}{100} \right)^4 \right]. \quad (5.35)$$

Анализ уравнения (5.35) показывает, что ошибка измерения уменьшается с уменьшением  $\frac{C_0 \varepsilon}{\alpha}$ , поэтому защитная трубка должна иметь блестящую (полированную) поверхность. Ошибка уменьшается также с увеличением  $\alpha$ , поэтому желательно, чтобы скорость измеряемого газа вблизи термопреобразователя была максимальной.

# ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУР

## ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУР ГАЗОВЫХ ПОТОКОВ И ПЛАМЕНИ

Наконец, ошибка зависит и от разности температур термопреобразователя и стенки трубопровода. Уменьшения ошибки в этом случае достигают тепловой изоляцией трубопровода на том участке, где установлен измеритель температуры. Ошибку, вызванную разностью температур защитной трубки и стенки трубопровода, можно значительно уменьшить, если вокруг защитной трубки установить экран из тонкого металлического листа.

Ошибку, вызванную утечкой теплоты через защитную трубку и арматуру измерителя (термопреобразователь рассматривают как однородный стержень конечной длины и постоянного сечения), определяют по формуле:

$$t_r - t = \frac{t_c}{ch(lA)},$$

(5.36)

где  $t_c$  — температура стенки, в которой закреплен верхний конец защитной трубки, °C;  $l$  — длина погруженной части защитной трубки;

( $\alpha$  — коэффициент теплоотдачи от газа к защитной трубке;  $d$  — наружный диаметр защитной трубки;  $\lambda$  — коэффициент теплопроводности материала защитной трубки;  $s$  — площадь поперечного

# ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУР

## ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУР ГАЗОВЫХ ПОТОКОВ И ПЛАМЕНИ

Пламя представляет собой частично прозрачную среду с пространственным температурным полем, которое меняется во времени. Измерение температуры пламени может осуществляться **пирометрами излучения или контактными термометрами**. При измерении температуры пламени по излучению происходит пространственное усреднение температуры вдоль оси визирования пирометра. На результаты измерения будут оказывать влияние излучающие компоненты (частицы сажи, двуокись углерода, водяной пар и другие твердые частицы), находящиеся в пламени. Большое значение имеет выбор длин волн, воспринимаемых пирометром. Неизлучающие горячие или холодные зоны газов принципиально не могут быть измерены пирометрами излучения без специального их подкрашивания.

Пирометры **спектрального отношения** могут применяться для измерения светящегося пламени, например подсвеченного сажей. Следует отметить, что применение любых методов измерения температуры пламени по излучению требует предварительного исследования спектральных характеристик пламени и условий, в которых будут проводиться измерения, с целью выявления факторов, оказывающих влияние на результаты измерения (других источников излучения, промежуточной среды, пыли и т. п.).

Одним из недостатков измерения температуры пламени пирометрами излучения является усреднение температуры вдоль оптической оси.