

## Средства и способы измерения температуры

Температурой называется величина, которая характеризует степень нагрева тела. Практически все технологические процессы и различные свойства вещества зависят от температуры.

Измерять температуру можно только косвенным путем, основываясь на зависимости от температуры таких физических свойств тел, которые поддаются непосредственному измерению. Эти свойства тел называют термометрическими. К ним относят длину, объем, плотность, термоЭДС, электрическое сопротивление и т. д. Вещества, характеризующиеся термометрическими свойствами, называют термометрическими. Средство измерений температуры называют термометром. Для создания термометра необходимо иметь температурную шкалу.

Температурной шкалой называют конкретную функциональную числовую связь температуры со значениями измеряемого термометрического свойства. В этой связи представляется возможным построение температурной шкалы на основе выбора любого термометрического свойства. В то же время нет ни одного термометрического свойства, которое линейно изменяется с изменением температуры и не зависит от других факторов в широком интервале измерения температур.

В настоящее время применяется Международная практическая температурная шкала (МПТШ) редакции 1968 г. Согласно МПТШ-68 основной температурой является термодинамическая температура  $T$ , единица которой кельвин (К) —  $1/273,16$  часть термодинамической температуры равновесия между твердой, жидкой и газообразной фазами воды (тройная точка воды). Температура Цельсия  $t$  определяется из выражения

$$t = T - T_0,$$

где  $T_0 = 273,15$  К.

Единица, применяемая для выражения температуры Цельсия, - градус Цельсия ( $^{\circ}\text{C}$ ), равный кельвину. Разность температур выражают как в Кельвинах, так и в градусах Цельсия.

### Средства измерения температуры

В настоящее время в различных отраслях науки и в промышленности применяются десятки различных способов измерения температуры. В таблице 1.1 приведены наиболее распространенные в промышленности средства измерения температуры и указаны пределы применения серийных средств измерения.

Таблица 1.1 – Наиболее распространенных промышленные средства измерений температуры

Тип средства измерения	Разновидность средства измерения	Предел длительного применения -°С	
		нижний	верхний
Термометры расширения	Жидкостные стеклянные термометры	-200	600
	Манометрические термометры	-200 (-272)	1000
Термометры сопротивления	Металлические (проводниковые) термометры сопротивления	-260	1100
	Полупроводниковые термометры сопротивления	-272	600
Термоэлектрические термометры	Термоэлектрические термометры	-200 (-270)	2200 (2800)
Пирометры	Квазимонохроматические пирометры	700	6000 (100 000)
	Пирометры спектрального отношения	300	2800
	Пирометры полного излучения	-50	3500

Средство измерений температуры, предназначенное для выработки сигнала в форме, удобной для восприятия наблюдателем, автоматической обработки, передачи и использования в автоматических системах управления, называется термометром.

Средство измерения температуры по тепловому электромагнитному излучению называется пирометром. Пирометры применяются для бесконтактного измерения температуры.

В автоматических системах измерение и контроль температуры осуществляют на основе измерения физических свойств тел, функционально связанных с температурой последних. Приборы для измерения и контроля температуры по принципу действия могут быть разделены на следующие группы:

А. Термометры для измерения температуры контактным методом.

1. Термометры расширения, измеряющие температуру по тепловому расширению жидкости (жидкостные) или твердых тел (дилатометрические, биметаллические).

2 Манометрические термометры и преобразователи, использующие зависимость между температурой и давлением газа (газовые) или насыщенных паров жидкости (конденсационные).

3. Термоэлектрические преобразователи (ТП), работающие в комплекте со вторичными приборами или измерительными преобразователями; принцип действия основан на измерении термоэлектродвижущей силы (термоЭДС), развиваемой термопарой (спаем) из двух различных проводников (термоЭДС зависит от разности температур спаев и свободных концов ТП, присоединяемых к измерительной схеме).

4 Термопреобразователи сопротивления (ТС), работающие в комплекте со вторичными приборами или измерительными преобразователями различного типа, используют изменение электрического сопротивления материалов (металлов, полупроводников) в зависимости от изменения температуры.

Б. Пирометры для измерения температуры бесконтактным методом.

1. Яркостные пирометры, измеряющие температуру по яркости нагретого тела на данной длине волны.

2. Радиационные пирометры для измерения температуры по левому действию лучеиспускания накаливаемого тела во всем спектре длин волн.

### Термометры расширения

Стеклянные жидкостные термометр.

Принцип действия стеклянных жидкостных термометров основан на расширении термометрической жидкости, заключенной в термометре, в зависимости от температуры. Стеклянные термометры по своей конструкции бывают палочные и с вложенной шкалой. Стеклянный термометр с вложенной шкалой состоит из стеклянного резервуара 1 и припаянного к нему стеклянного капилляра 2 рисунок 1.86 (а).

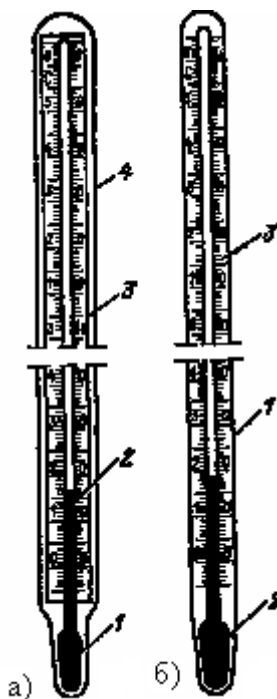


Рисунок 1.86 - Стеклянный жидкостный термометр

Вдоль капилляра расположена шкала 3, которая, как правило, наносится на плас-

тине молочного стекла. Резервуар, капилляр и шкала помещаются в стеклянную оболочку 4, которая припаивается к резервуару. Палочные стеклянные термометры изготавливаются из толстостенных капилляров 1, к которым припаивается резервуар 2. Шкала термометра 3 наносится на наружной поверхности капилляра рисунок 1.86(б).

Температура измеряемой среды, в которую помещены резервуар и часть капилляра, определяется по изменению объема термометрической жидкости, отсчитываемому по положению уровня жидкости в капилляре, которое отградуировано в градусах Цельсия. В связи с тем что одновременно с расширением термометрической жидкости происходит также расширение резервуара и капилляра, фактически мы судим о температуре не по изменению объема жидкости, а по видимому изменению объема термометрической жидкости в стекле. Поэтому видимое расширение жидкости несколько меньше действительного.

Среди жидкостных термометров наибольшее распространение получили ртутные стеклянные термометры. Химически чистая ртуть как термометрическое вещество имеет ряд достоинств: она остается жидкостью в широком интервале температур, не смачивает стекло, легко может быть получена в чистом виде. Однако ртуть имеет относительно малый температурный коэффициент объемного расширения, что требует изготовления термометров с тонкими капиллярами. Нижний предел измерения ртутных термометров минус 35°C определяется температурой затвердевания ртути. Верхний предел измерения плюс 600°C определяется прочностными характеристиками стекла. В связи с тем что температура кипения ртути при атмосферном давлении значительно меньше верхнего предела применения ртутных термометров, в термометрах, предназначенных для измерения высоких температур, капилляр над ртутью заполняется инертным газом, например азотом. При этом для исключения образования паров ртути в капилляре давление газа должно быть тем больше, чем выше верхний предел измерения. Для термометров с верхним пределом измерения 600 °C давление газа над ртутью превышает 3МПа (30 кгс/см<sup>2</sup>). Стеклянные термометры с органическими термометрическими жидкостями применяются в интервале температур от минус 200 до плюс 200°C. Однако эти жидкости смачивают стекло и поэтому требуют применения капилляров с относительно большим диаметром канала.

К достоинствам стеклянных жидкостных термометров относятся высокая точность измерения, простота и дешевизна. Недостатками стеклянных термометров являются относительно плохая видимость шкалы, практическая невозможность передачи показаний на расстояние и, следовательно, невозможность автоматической регистрации показаний, а также невозможность ремонта термометров.

В настоящее время выпускаются следующие разновидности стеклянных термометров.

1. Технические ртутные термометры с вложенной шкалой прямые рисунок 1.87 (а) и угловые рисунок 1.87 (б), выпускаются 11 модификаций со шкалами  $-90 \div +30$ ;  $-60 \div +50$ ;  $-30 \div +50$ ;  $0—100$ ;  $0—160$ ;  $0—200$ ;  $0—300$ ;  $0—350$ ;  $0—450$ ;  $0—500$  и  $0—600^{\circ}\text{C}$ . Цена деления шкалы составляет от  $0,5^{\circ}\text{C}$  (шкала минус  $30 \div$  плюс  $50^{\circ}\text{C}$ ) до  $5$  и  $10^{\circ}\text{C}$  (шкала  $0—600^{\circ}\text{C}$ ).

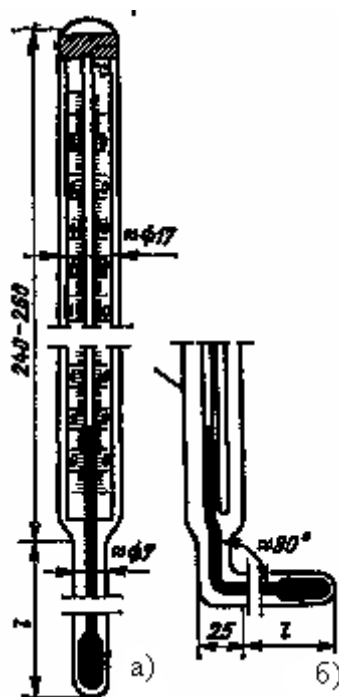


Рисунок 1.87 - Технические стеклянные термометры а – прямой; б - угловой

2. Лабораторные ртутные термометры палочные рисунок 1.85 (б) и с вложенной шкалой рис. 1.85 (а) предназначены для измерения температур от минус  $30$  до плюс  $600^{\circ}\text{C}$ . Эти термометры погружаются в измеряемую среду до отсчитываемой температурной отметки. Термометры подразделяются на четыре группы. Термометры с ценой деления  $0,1^{\circ}\text{C}$  имеют диапазон измерения  $55^{\circ}\text{C}$  (например,  $0—55^{\circ}\text{C}$  или  $200—255^{\circ}\text{C}$ ) с верхним пределом измерения не более  $305^{\circ}\text{C}$ . Для больших диапазонов измерения  $0—500^{\circ}\text{C}$ ,  $0—600^{\circ}\text{C}$  цена деления шкалы  $2^{\circ}\text{C}$ .

3. Жидкостные (не ртутные) термометры (ГОСТ 9177-74) выпускаются палочные, с вложенной шкалой и с наружной шкальной пластиной на пределы измерения от минус  $200$  до плюс  $200^{\circ}\text{C}$  с ценой деления от  $0,2$  до  $5$ .

4. Термометры ртутные повышенной точности и образцовые (ГОСТ 13646-68) выпускаются с узкими диапазонами измерения (от  $4$  до  $50^{\circ}\text{C}$ ) и с ценой деления от  $0,01$  до  $0,1^{\circ}\text{C}$ .

5. Термометры ртутные электроконтактные (ГОСТ 9871-75) выпускаются для поддержания постоянной температуры или сигнализации заданной температуры в интервале от минус 30 до плюс 300°C. Термометры выпускаются с постоянным рабочим и с подвижным рабочим контактами, которые могут быть установлены на любом значении температуры в пределах шкалы.

6. Специальные термометры; медицинские (максимальные), метеорологические (максимальные, минимальные, психрометрические, почвенные и др.) и другого назначения.

Стеклянные термометры являются одним из наиболее точных средств измерения температуры.

### Манометрические термометры

Принцип действия манометрических термометров основан на зависимости давления термометрического вещества в герметически замкнутом объеме от температуры. Термосистема манометрического термометра рисунок 1.87 состоит из термобаллона 1, капилляра 2 и манометрической пружины, один конец которой соединен с капилляром, а другой, запаянный конец пружины соединен со стрелкой измерительного прибора 3.

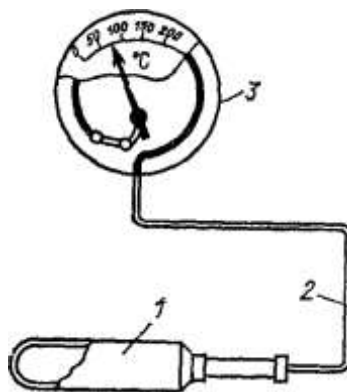


Рисунок 1.87 - Манометрический термометр

Манометрические термометры в зависимости от вида рабочего (термометрического) вещества, заполняющего термосистему, подразделяются на газовые, жидкостные и конденсационные. Манометрические термометры изготавливаются для измерения температур от минус 200 до плюс 600°C, конкретные диапазоны измерения определяются наполнителем термосистемы. Термометры со специальным наполнителем применяются для измерения температур от 100 до 1000°C (ГОСТ 8624-80).

Термобаллон термометра погружается в измеряемую среду, и рабочее вещество, находящееся в термобаллоне, принимает температуру измеряемой среды. При этом в термосистеме устанавливается давление, определяемое температурой измеряемой среды.

При повышении температуры давление повышается, при уменьшении температуры понижается. Изменение давления рабочего вещества через гибкий капилляр передается на измерительный прибор, являющийся частью манометрического термометра. Измерительный прибор является пружинным манометром, рассчитанным на те диапазоны измерения давления, которые имеют место в термосистемах манометрических термометров.

Газовые манометрические термометры.

Газовые манометрические термометры предназначены для измерения температуры от минус 200 до плюс 600 °С. В качестве рабочего вещества в газовых термометрах применяется азот. Зависимость давления газа от температуры при постоянном объеме описывается линейным уравнением

$$p_t = p_0(1 + \beta t),$$

где  $p_t$  и  $p_0$  — давление газа при температурах  $t$  и 0 °С;

$\beta$  - температурный коэффициент расширения газа,  $\beta = 1/273$ , или  $0,00366 \text{ K}^{-1}$ .

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. Для уменьшения этого влияния стремятся уменьшить отношение внутреннего объема пружины и капилляра к объему термобаллона. Для этого увеличивают длину термобаллона или его диаметр. Длина термобаллона газового манометрического термометра не должна превышать 400 мм, а диаметр термобаллона выбирается из ряда 5, 8, 10, 12, 16, 20, 25 и 30 мм (ГОСТ 8624-80). Длина капилляра может составлять от 0,6 до 60 м. Для уменьшения температурной погрешности в некоторых измерительных приборах внутри устанавливают термокомпенсаторы. Специально изготовленные газовые манометрические термометры могут применяться и для измерения температур более низких, чем 0 °С. Например, водородный газовый термометр может применяться до минус 250 °С, а гелиевый — до минус 267 °С.

Жидкостные манометрические термометры.

Жидкостные манометрические термометры предназначены для измерения температуры от минус 150 до плюс 300 °С. В качестве рабочего вещества, заполняющего термосистему, применяют ртуть, пропиловый спирт, метаксилол и 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. Давление, при котором это будет иметь место, зависит от жесткости пружины и для различных манометрических пружин может быть различным.

В жидкостных манометрических термометрах 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 манометрических термометрах: уменьшают относительный объем жидкости, находящейся при температуре окружающей среды, уменьшая внутренний объем термокапилляра и пружины, или внутрь измерительного прибора встраивают специальные термокомпенсаторы погрешности.

В жидкостных манометрических термометрах может иметь место гидростатическая погрешность, возникающая при различных уровнях расположения термобаллона и измерительного прибора. Для снижения возможных гидростатических погрешностей длину капилляра уменьшают до 10 м. Допускаемые расстояния по высоте между термобаллоном и измерительным прибором указываются в инструкциях к приборам.

Конденсационные манометрические термометры.

Конденсационные манометрические термометры предназначены для измерения температур от минус 50 до плюс 300°C. Термобаллон термометра примерно на 3/4 заполнен низкокипящей жидкостью, а остальная часть заполнена насыщенным паром 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. Капилляр и манометрическая пружина заполняются, как правило, другой жидкостью. Давление в термосистеме конденсационного манометрического термометра будет равно давлению насыщенного пара рабочей жидкости, определяемому в свою очередь температурой, при которой находится рабочая жидкость, т. е. температурой измеряемой среды с помещенным в нее термобаллоном. Эта зависимость давления насыщения пара от температуры имеет нелинейный вид, она однозначная, когда измеряемая температура не превышает критическую.

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

Манометрические термометры отличаются простотой устройства, возможностью



дистанционной передачи показаний и автоматической записи. Одним из важных преимуществ является возможность их использования в пожаро- и взрывоопасных помещениях. К недостаткам относится трудность ремонта при разгерметизации системы, ограниченное расстояние дистанционной передачи показаний и во многих случаях большие размеры термобаллона. Газовые и жидкостные манометрические термометры имеют класс точности 1; 1,5 и 2,5, конденсационные — 1,5; 2,5 и 4.

### Термоэлектрические термометры

Применение термоэлектрических термометров для измерения температуры основано на зависимости термоэлектродвижущей силы термопары от температуры. Термоэлектродвижущая сила (термо-ЭДС) возникает в цепи, составленной из двух разнородных проводников при неравенстве температур в местах соединения этих проводников, если в цепи температуры мест соединения проводников  $a$  и  $b$  будут одинаковы и равны  $t$  рисунок 1.88, то и разности потенциалов будут равны по значению, но иметь разные знаки, а суммарная термо-ЭДС и ток в цепи будут равны нулю.

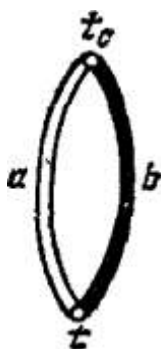


Рисунок 1.88 – Термоэлектрическая цепь

Если  $t \neq t_0$ , то суммарная термо-ЭДС не равна нулю, так как разности потенциалов для одних и тех же проводников при разных температурах не равны. Результирующая термо-ЭДС зависит для данных проводников  $a$  и  $b$  от температур  $t$  и  $t_0$ . Чтобы получить однозначную зависимость термо-ЭДС от измеряемой температуры  $t$ , необходимо другую температуру  $t_0$  поддерживать постоянной.

Для измерения термо-ЭДС в цепь термоэлектрического термометра включают измерительный прибор, причем его включение вводит в цепь по крайней мере еще один, третий проводник.

Для измерения температуры термоэлектрическим термометром необходимо измерить термо-ЭДС, развиваемую термометром, и температуру свободных концов. Если температура свободных концов термометра при измерении температуры равна  $0^\circ\text{C}$ , то измеряемая температура определяется сразу из градуировочной характеристики (таблиц,

графиков) рисунок 1.89, устанавливающей зависимость термо-ЭДС от температуры рабочего спая.

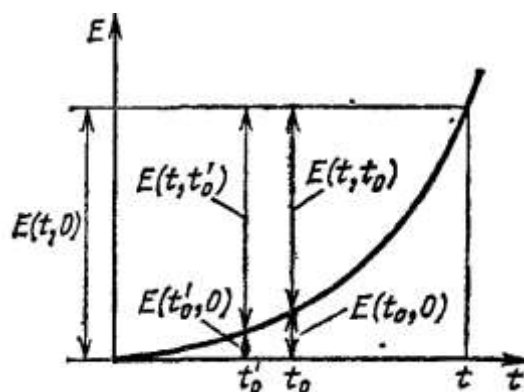


Рисунок 1.89 – Введение поправки на температуру свободных концов термоэлектрического термометра

Градуировочные характеристики термоэлектрических термометров определены, как правило, при температуре свободных концов, равной 0 °С. Если температура свободных концов на практике отличается от 0°С, но остается постоянной, то для определения температуры рабочего конца по градуировочной характеристике необходимо знать не только термо-ЭДС, развиваемую термометром, но и температуру свободных концов  $t_0$ . Чтобы ввести поправку на температуру свободных концов  $t_0$ , если  $t_0$ , необходимо к термо-ЭДС, развиваемой термоэлектрическим термометром  $E(t, t_0)$ , прибавить  $E(t_0, 0)$ , чтобы получить значение термо-ЭДС  $E(t, 0)$ :

$$E(t, t_0) + E(t_0, 0) = E(t, 0),$$

Такую термо-ЭДС  $E(t, 0)$  развивает термоэлектрический термометр при температуре рабочего спая  $t$  и температуре свободных концов 0°С, т. е. при условиях градуировки.

Если в процессе измерения температура свободных концов примет какое-то новое значение  $t'_0$ , то термо-ЭДС, развиваемая термометром, будет  $E(t, t'_0)$  рисунок 1.89 и величина поправки на температуру свободных концов будет  $E(t'_0, 0)$ , а термо-ЭДС, соответствующая условиям градуировки,

$$E(t, t'_0) + E(t'_0, 0) = E(t, 0).$$

Значение поправки на температуру свободных концов термоэлектрического термометра зависит от градуировочной характеристики термометра, определяемой материалами проводников, из которых изготовлен термоэлектрический термометр. Независимо от способа введения поправки (расчетного или автоматического) методика введения поправки остается неизменной: определяется расчетным путем или автоматически в схеме получается значение  $E(t_0, 0)$ , которое затем суммируется с термо-ЭДС термопары. Суммарная термо-ЭДС  $E(t, 0)$  соответствует градуировочному

значению.

Устройство термоэлектрических термометров и применяемые материалы. Два любых разнородных проводника могут образовать термоэлектрический термометр. К материалам, используемым для изготовления термоэлектрических термометров, предъявляется целый ряд требований жаростойкость, жаропрочность, химическая стойкость, воспроизводимость, стабильность, однозначность и линейность градуировочной характеристики и ряд других. К числу обязательных требований относятся стабильность градуировочной характеристики и (для стандартных термометров) воспроизводимость в необходимых количествах материалов, обладающих вполне определенными термоэлектрическими свойствами. Все остальные требования являются желательными. Например, могут быть очень жаропрочные материалы, воспроизводимые с однозначной и линейной градуировочной характеристикой и высоким коэффициентом преобразования. Но если градуировочная характеристика этих материалов нестабильна, то измерять таким термометром нельзя. С другой стороны, материалы, имеющие низкий коэффициент преобразования, нелинейную градуировочную характеристику, но имеющие стабильную характеристику, используются для термоэлектрических термометров.

Стандартные термоэлектрические термометры, характеристики которых приведены в таблице 1.2.

Таблица 1.2 – Стандартные термоэлектрические термометры

Тип термопары термоэлектрического термометра	Обозначение новое (старое)	Рабочий диапазон длительного режима работы, °С	Максимальная температура кратковременного режима работы, °С
Медь-копелевая	-	-200 ÷ +100	-
Медь-медноникелевая	T	-200 ÷ +400	-
Железо-медноникелевая	J	-200 ÷ +700	900
Хромель-копелевая	(ХК)	-50 ÷ +600	800
<i>Никельхром-медноникелевая</i>	E	-100 ÷ +700	900
Никельхром-никельалюминиевая (хромель алюмелевая)	K (ХА)	-200 ÷ +1000	1300
Платинородий (10 %)-платиновая	S (ПП)	0 ÷ +1300	1600
Платинородий (30 %)-платинородиевая (6 %)	B (ПР)	300—1600	1800
Вольфрамрений (5 %)-вольфрамрениевая (20 %)	(ВР)	0—2200	2500

Медь-копелевые и медь-медноникелевые типа T (близкие к медь-константановым)

термоэлектрические термометры применяются главным образом для измерения низких температур в промышленности и лабораторной практике. Применение этих термометров для температур менее 200 °С осложняется существенным уменьшением коэффициента преобразования с уменьшением температуры. При температурах свыше 400 °С начинается интенсивное окисление меди, что ограничивает применение термометров этих типов.

Железо-медноникелевые, близкие к железо-константановым термоэлектрическим термометры типа J применяются в широком диапазоне температур от минус 200 до плюс 700 °С, а кратковременно — и до 900 °С. Они имеют достаточно большой коэффициент преобразования (около 55 мкВ/°С). Верхний предел измерения ограничен окислением железа и медноникелевого сплава.

Хромель-копелевые термоэлектрические термометры обладают наибольшим коэффициентом преобразования из всех стандартных термометров (около 70—90 мкВ/°С). Для термометров с термоэлектродами диаметром менее 1 мм верхний предел длительного применения менее 600 °С и составляет, например, для термоэлектродов диаметром 0,2—0,3 мм только 400 °С. Верхний предел применения определяется стабильностью характеристик копелевого термоэлектрода

Никельхром-медноникелевые (тип E), близкие к хромель-константановым, и никельхром-никельалюминиевые (тип K) термометры, ранее называемые хромель-алюмелевыми, применяются для измерения температуры различных сред в широком интервале температур. Термоэлектрод из никель-алюминиевой проволоки менее устойчив к окислению, чем никельхромовый. Верхние пределы применения зависят от диаметра термоэлектродов. Для термоэлектродов диаметром 3—5 мм верхний предел длительного применения никельхром - никельалюминиевых термометров составляет 1000 °С, а для диаметра 0,2—0,3 мм — не более 600 °С. Для никельхром-медноникелевой термопары он не превышает 700 °С.

Все вышеперечисленные термоэлектрические термометры из неблагородных материалов хорошо стоят в инертной и восстановительной атмосфере, в окислительной атмосфере их срок службы ограничен. Кроме того, термоэлектрические термометры хромель-копелевые и никельхром-никельалю-миниевые (хромель-алюмелевые) отличаются достаточно высокой стабильностью градуировочной характеристики при высокой интенсивности ионизирующих излучений

Платинородий-платиновые термоэлектрические термометры (тип S) могут длительно работать в интервале температур от 0 до 1300 °С, а кратковременно — до 1600 °С. Положительный термоэлектрод представляет собой сплав, состоящий на 10 процентов из родия и на 90 процентов из платины, отрицательный термоэлектрод состоит из чистой

платины. Эти термометры сохраняют стабильность градуировочной характеристики в окислительной и нейтральной средах. В восстановительной атмосфере платинородий-платиновые термометры работать не могут, так как происходит существенное изменение термо-ЭДС термометра. Так же неблагоприятно воздействует на платинородий-платиновые термометры контакт с углеродом, парами металлов, соединениями углерода и кремния, а также рядом других материалов, загрязняющих термоэлектроды. Следует отметить, что градуировочная характеристика типа S не совпадает с градуировочной характеристикой ПП, применявшейся ранее.

Платинородий-платинородиевые термоэлектрические термометры (тип В) применяются длительно в интервале температур от 300 до 1600°C, кратковременно—до 1800°C Положительный электрод — сплав из 30 процентов родия и 70 процентов платины, а отрицательный — из 6 процентов родия и 94 процентов платины. Эти термометры отличаются большей стабильностью градуировочной характеристики, чем платинородий-платиновые, но они также плохо работает в восстановительной среде. В связи с тем, что термо-ЭДС, развиваемая платино-родийплатинородиевыми термометрами в интервале температур 0—100°C, незначительна, при технических измерениях их можно применять без термостатирования свободных концов. Например, если температура свободных концов 70 °C и поправка на нее не вводится, то при температуре рабочего спая 1600°C это вызовет погрешность около 2,1°C. Градуировочная характеристика типа В также не совпадает с градуировочной характеристикой ПР.

Вольфрамрений - вольфрамрениевые термоэлектрические термометры предназначены для длительного измерения температур от 0 до 2200 °C и кратковременно до 2500 °C в вакууме, в нейтральной и восстановительной средах. Положительный термоэлектрод — сплав из 95 процентов вольфрама и 5 процентов рения, отрицательный—сплав из 80 процентов вольфрама и 20 процентов рения..

#### Термопреобразователи сопротивления.

Измерение температуры термопреобразователями сопротивления основано на свойстве металлов и полупроводников изменять свое электрическое сопротивление с изменением температуры. Если априорно известна зависимость между электрическим сопротивлением  $R_t$  термопреобразователя сопротивления и его температурой  $t$   $R_t=f(t)$  - градуировочная характеристика, то, измерив  $R_t$ , можно определить значение температуры среды, в которую он погружен.

Термопреобразователи позволяют надежно измерять температуру в пределах от

минус 260 до плюс 1100°C. К металлическим проводникам термопреобразователей сопротивления предъявляется ряд требований, основными из которых являются стабильность градуировочной характеристики, а также ее воспроизводимость, обеспечивающая взаимозаменяемость изготавливаемых термопреобразователей сопротивления. К числу не основных, но желательных требований относятся: линейность функции  $R_t=f(t)$ , по возможности высокое значение температурного коэффициента электрического сопротивления, большое удельное сопротивление и невысокая стоимость материала.

Исследованиями установлено, что чем чище металл, тем в большей степени он отвечает указанным основным требованиям и тем больше значения отношения электрического сопротивления металла при 100 и при 0°C соответственно  $R_{100}/R_0$  и  $\alpha$ . Поэтому степень чистоты металла, а также наличие в нем механических напряжений, принято характеризовать значениями  $R_{100}/R_0$  и  $\alpha$ . При снятии механических напряжений в металле путем его отжига указанные характеристики достигают своих предельных значений для данного металла.

Для изготовления стандартизованных термопреобразователей сопротивления в настоящее время применяют платину и медь.

Платина является наилучшим материалом для термопреобразователей сопротивления, так как легко получается в чистом виде, обладает хорошей воспроизводимостью, химически инертна в окислительной среде при высоких температурах, имеет достаточно большой температурный коэффициент сопротивления, равный  $3,94 \cdot 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ , и высокое удельное сопротивление  $0,1 \cdot 10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{м}$ . Платиновые преобразователи сопротивления используются для измерения температуры от минус 260 до плюс 1100°C, при этом для диапазона температур от минус 260 до плюс 750°C используются платиновые проволоки диаметром 0,05—0,1 мм, а для измерения температур до 1100°C, в силу распыления платины при этих температурах, диаметр проволоки составляет около 0,5 мм. Значение отношения  $R_{100}/R_0$  для применяемых платиновых проволок составляет 1,3850 - 1,3910.

Платиновые термопреобразователи сопротивления являются наиболее точными первичными преобразователями в диапазоне температур, где они могут быть использованы. Платиновые термопреобразователи сопротивления используются в качестве рабочих, образцовых и эталонных термометров. С помощью последних осуществляется воспроизведение международной шкалы температур в диапазоне от - 182,97 до 630,5 °C.

Недостатком платины является нелинейность функции  $R_t=f(t)$  и, кроме того, платина — очень дорогой металл.

Медь — один из недорогостоящих металлов, легко получаемых в чистом виде. Медные термопреобразователи сопротивлений предназначены для измерения температуры в диапазоне от минус 50 до плюс 200°С. При более высоких температурах медь активно окисляется и потому не используется. Диаметр медной проволоки обычно 0,1 мм, а значение отношения  $R_{100}/R_0$  составляет 1,4260 - 1,4280. В широком диапазоне температур зависимость сопротивления от температуры линейна и имеет вид  $R_t=R_0(1+at)$ , где  $a=4,26 \cdot 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ .

Полупроводниковые термопреобразователи сопротивления применяются для измерения температуры от минус 100 до плюс 300 °С. В качестве материалов для них используются различные полупроводниковые вещества — оксиды магния, кобальта, марганца, титана, меди, кристаллы германия. Основным преимуществом полупроводников является их большой отрицательный температурный коэффициент сопротивления. При повышении температуры полупроводников на один градус их сопротивление уменьшается на 3—5 процента, что делает их очень чувствительным к изменению температуры. Кроме того, они обладают значительным удельным сопротивлением и потому даже при очень малых размерах обладают значительным номинальным электрическим сопротивлением (от нескольких до сотен килоОм), что позволяет не учитывать сопротивления соединительных проводов и элементов измерительной схемы. Следствием же малых размеров полупроводниковых термопреобразователей сопротивления является возможность безынерционного измерения температуры.

Недостатком полупроводниковых материалов является их значительная нелинейность и, главное, невоспроизводимость градуировочной характеристики. Поэтому полупроводниковые термопреобразователи сопротивления даже одного и того же типа имеют индивидуальные градуировки и не взаимозаменяемы.

Исключением являются германиевые термопреобразователи сопротивления, которые при технических измерениях используются для температур 30—90 К с погрешностью плюс минус (0,05—0,1) К, а также специальный германиевый термопреобразователь, предназначенный в качестве эталонного термометра для воспроизведения температурной шкалы в интервале 4,2—13,81 К с погрешностью не более плюс минус 0,001 К.

Чувствительные элементы из полупроводников выполняются в виде цилиндров, шайб, бусинок малых размеров.

В силу указанных недостатков полупроводниковые термопреобразователи сопротивления редко используются для измерения температуры. Они находят широкое

применение в системах температурной сигнализации, вследствие присущего им релейного эффекта — скачкообразного изменения сопротивления при достижении определенной температуры. Кроме того, полупроводниковые термопреобразователи сопротивления используются в качестве чувствительных элементов в различных газоаналитических автоматических приборах.

В практике технологических измерений температуры с использованием термопреобразователей сопротивления широкое применение нашли мосты (уравновешенные и неуравновешенные), логометры и нормирующие преобразователи.

Для точных измерений температуры и метрологической аттестации термопреобразователей сопротивления, проводимых обычно в лабораторных условиях, получили применение потенциометры постоянного тока.

### Пирометры излучения

Для измерения температуры (термометры расширения, термоэлектрические и сопротивления) предусматривают непосредственный контакт между чувствительным элементом термометра и измеряемым телом или средой. Поэтому такие методы измерения температуры иногда называются контактными. Верхний предел применения контактных методов ограничивается значениями 1800—2200 °С. Однако в ряде случаев в промышленности и при исследованиях возникает необходимость измерять более высокие температуры. Кроме того, часто недопустим непосредственный контакт термометра с измеряемым телом или средой. В этих случаях применяются бесконтактные средства измерения температуры, которые измеряют температуру тела или среды по тепловому излучению. Все физические тела, температура которых превышает абсолютный нуль, испускают тепловые лучи. Средства измерения, определяющие температуру тел по их тепловому излучению, называют пирометрами излучения или просто пирометрами. Серийно выпускаемые пирометры применяются для измерения температур от 20 до 6000 °С.

Бесконтактные методы измерения теоретически не имеют верхнего предела измерения и возможности их использования определяются соответствием спектров излучения измеряемых тел или сред и спектральных характеристик пирометров. Если для каких-либо условий могут быть использованы и контактные и бесконтактные методы измерения, то, как правило, предпочтение следует отдать контактными, так как они позволяют обеспечить более высокую точность измерения.

Тепловое излучение представляет собой электромагнитное излучение, испускаемое веществом за счет его внутренней энергии (в отличие, например, от люминесценции,



которая возбуждается внешними источниками энергии).

Ввиду того, что интенсивность теплового излучения резко убывает с уменьшением температуры тел, пирометры используются, в основном, для измерения температуры от 300 до 6000°C и выше. Для измерения температур выше 3000 °C методы пирометрии являются практически единственными, так как они бесконтактны, т. е. не требуют непосредственного контакта датчика прибора с объектом измерения. Теоретически верхний предел измерения температуры пирометрами излучения неограничен.

Следует также отметить, что бесконтактные методы измерения обладают тем положительным свойством, что при использовании их не искажается температурное поле объекта измерения. В то же время для тех интервалов температур, где могут применяться и контактные методы, последним отдается предпочтение из-за их более высокой точности.

Большинство твердых и жидких тел имеет сплошной спектр излучения, т.е. излучает волны всех длин  $\lambda$  в диапазоне от 0 до  $\infty$ . Видимое глазом человека излучение, называемое светом, охватывает диапазон длин волн 0,40—0,75 мкм. Невидимые лучи охватывают инфракрасный участок спектра, т. е. диапазон от  $\lambda = 0,75$  до  $\lambda \approx 400$  мкм, за которым следует постепенный переход в радиоволновой диапазон. Лучи с  $\lambda < 0,40$  мкм также невидимы и относятся к ультрафиолетовому диапазону, за которым следуют рентгеновские и гамма-лучи.

Для измерения яркостной температуры тел используются оптические (квазимонохроматические) визуальные пирометры, а также фотоэлектрические пирометры.

#### Оптические пирометры.

Оптические пирометры широко применяются в лабораторных и производственных условиях для измерения температур выше 800°C. Принцип действия оптических пирометров основан на сравнении спектральной яркости тела со спектральной яркостью градуированного источника излучения. В качестве чувствительного элемента, определяющего совпадение спектральных яркостей в визуальных оптических пирометрах, служит глаз человека.

#### Фотоэлектрические пирометры.

Фотоэлектрические пирометры. В отличие от оптических визуальных пирометров фотоэлектрические пирометры являются автоматическими. Чувствительными элементами, воспринимающими лучистую энергию, в этих приборах могут служить фотоэлементы, фотоумножители, фотосопротивления и фотодиоды. Измерение температуры фотоэлектрическими пирометрами, как и оптическими визуальными, основано на зависимости спектральной яркости тела от его температуры.

Фотоэлектрические пирометры по принципу действия бывают двух типов. К первому типу относятся приборы, в которых воспринимаемая прибором лучистая энергия, попадая на чувствительный элемент, изменяет его параметры (фототок, сопротивление). В приборах второго типа измерение лучистой энергии осуществляется компенсационным методом, здесь чувствительный элемент работает в режиме нуль-индикатора, сравнивая интенсивности излучения от измеряемого тела и стабильного источника излучения - миниатюрной лампочки накаливания.

Фотоэлектрические пирометры второго типа более сложны, но более точны, так как их показания не зависят от характеристик чувствительного элемента и электронной схемы.

Пирометры спектрального отношения.

Пирометры спектрального отношения, или цветные пирометры, как указывалось, предназначены для определения цветовой температуры путем измерения отношения спектральных энергетических яркостей, соответствующих двум длинам волн.

Существует несколько модификаций двух- и одноканальных цветных пирометров. В двухканальных пирометрах измерительные сигналы, соответствующие каждой длине волны излучения, передаются одновременно по двум независимым каналам, и из соотношения величин данных сигналов определяется мгновенная цветовая температура объекта. В пирометрах с одноканальной схемой измерения два различных монохроматических потока с помощью оптического коммутатора поочередно подаются на один фотоэлектрический приемник.

Двухканальные пирометры используются в основном в лабораторной практике, когда требуется измерять температуру с большой скоростью.

Одноканальные пирометры нашли широкое применение благодаря большой стабильности их работы, так как в этих пирометрах одновременно с изменением характеристик схемы (изменение чувствительности фотоприемника, напряжения питания и др.) происходит изменение значений обоих сигналов, соответствующих различным длинам волн.

Показания цветного пирометра однозначно связаны с логарифмом отношения спектральных яркостей и, следовательно, с цветовой температурой объекта.

Диапазон измерений описываемого пирометра 1400—2800°С. Он подразделяется на пять-шесть поддиапазонов по 250—300°С. Меняя диск со светофильтрами, переходят от одного диапазона измерений к другому. Класс точности пирометра 1.

Радиационные пирометры, или пирометры полного излучения,— это приборы, воспринимающие излучение от объекта во всем спектральном диапазоне. Строго говоря,

приемники излучения имеют ограниченный рабочий диапазон длин волн и поэтому в пирометре используется не полный спектр излучения, а лишь определенная полоса спектра. И все же принято считать, что пирометр является радиационным, если в нем используется не менее 90 процентов излучения от объекта измерения. Радиационные пирометры имеют самый широкий диапазон измерения, он лежит в интервале 50—2000°С и выше.

Измерение температуры радиационными пирометрами основано на улавливании теплового излучения и концентрировании его на термочувствительном элементе с помощью собирающей линзы (рефракторные приборы) или вогнутых зеркал (рефлекторные приборы).

Классы точности радиационных пирометров 1,0 и 1,5. Постоянная времени этих приборов составляет 0,3—1,5 с. При установке телескопа между ним и объектом не должно быть паров влаги, дыма, пыли, так как последние поглощают лучистую энергию, что может привести к дополнительной погрешности измерения. Кроме того, следует оберегать корпус прибора от нагрева выше 100—200°С. Если это невозможно, то телескоп устанавливают в кожух с водяным охлаждением.