

Государственное автономное образовательное учреждение
среднего профессионального образования Ленинградской области

Киришский политехнический техникум

**ПМ. 02 Обслуживание и настройка средств контроля и
автоматического регулирования**

Методическое пособие

« Первичные измерительные преобразователи температуры»

для студентов среднего профессионального образования по специальности:

18.01.28 Оператор нефтепереработки

РАССМОТРЕНО

На заседании МК

Протокол № _____ от _____ 20__ г.

Председатель МК _____

УТВЕРЖДАЮ

Зам. директора по УПР

_____ М.В. Титова

« _____ » _____ 20__ г.

Методическое пособие составлено в соответствии с рабочей программой по ПМ. 02 Обслуживание и настройка средств контроля и автоматического регулирования в соответствии с ФГОС по специальности СПО 18.01.28 Оператор нефтепереработки

Разработчик:

Косарева И.Ю., преподаватель высшей категории

« _____ » _____ 2013г.

Пояснительная записка

Методическое пособие предназначено для изучения принципа действия и устройства прибора контроля основного параметра химико-технологического процесса: температуры.

Содержание методического пособия основано на программе дисциплины «Обслуживание технических средств автоматизации», изучаемой студентами по специальности 18.01.28 Оператор нефтепереработки.

В методическом пособии представлены основные контактные и бесконтактные методы и средства для измерения температуры. Методическое пособие сопровождается контрольными вопросами для самопроверки и тестом.

В приложении приведены градуировочные таблицы наиболее распространенных типов термометров сопротивления и термопар.

Автоматический контроль является логически первой ступенью автоматизации, без успешного функционирования которых невозможно создание эффективных АСУ ТП.

Содержание

1. ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ	3
1.1. Основные понятия	3
1.2. Температурные шкалы	3
1.3. Классификация средств измерения температуры	5
1.4. Термометры расширения	6
1.4.1. Жидкостные термометры	6
1.4.2. Дилатометрические термометры	8
1.4.3. Биметаллические термометры	8
1.5. Манометрические термометры	9
1.5.1. Газовые манометрические термометры	11
1.5.2. Жидкостные манометрические термометры	11
1.5.3. Конденсационные манометрические термометры.....	12
1.6. Термоэлектрические термометры	13
1.6.1. Основные понятия и определения	13
1.6.2. Принцип действия	13
1.6.3. Основные источники погрешности при измерении температуры с помощью термопар.....	18
1.7. Термопреобразователи сопротивления	20
1.7.1. Принцип действия	20
1.7.2. Типы термопреобразователей сопротивления	21
1.7.3. Конструкция термопреобразователей сопротивления	22
1.8. Бесконтактные методы измерения температуры	24
1.8.1. Пирометры частичного излучения	26
1.8.2. Пирометры спектрального отношения (цветовые).....	28
1.8.3. Пирометры полного излучения (радиационные)	29
1.8.4. Тепловизоры	31
Контрольные вопросы.....	33
Тест.....	35
Приложения	
Список литературы	

1. ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ

1.1. Основные понятия

Измерение температур имеет важное значение в промышленном производстве. Во многих технологических процессах химической и нефтеперерабатывающей промышленности температурный контроль имеет решающее значение.

Температурой называют величину, характеризующую тепловое состояние тела. Согласно кинетической теории температурой называют физическую величину, количественно характеризующую 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, термо-ЭДС, интенсивности излучения и т.д.).

Средство измерения температуры называют **термометром**.

1.2. Температурные шкалы

С момента изобретения термометра Г.Галилеем в 1595г. предлагалось много различных температурных шкал.

В системе СИ основной единицей является Кельвин. Градус Кельвина определяется как $1/273,16$ часть температуры тройной точки воды.

Последняя есть температура равновесного состояния водяного пара, жидкой воды и льда.

Привычная нам **десятичная температурная шкала** была предложена А. Цельсием в 1742 году, в которой расстояние по шкале между точкой таяния льда и точкой кипения воды делилось на 100 частей. Градус Цельсия определяется по формуле:

$$T(^{\circ}\text{C})=T(\text{K}) - 273,16. \quad (1.1)$$

В США общепринятой является **шкала Фаренгейта**. В качестве нижней опорной точки (0°F) изобретатель шкалы использовал температуру замерзания солевого раствора, самую низкую воспроизводимую в то время, а в качестве верхней точки - температуру тела человека. Согласно этой шкалы, разность температур между таянием льда и кипением воды делится на 180 частей, а температуре таяния льда приписана температура 32°F .

Перевод °C в °F легко можно сделать по формуле:

$$T(^{\circ}\text{C}) = \frac{5}{9}(T(^{\circ}\text{F}) - 32) . \quad (1.2)$$

В абсолютной термодинамической шкале температура в Кельвинах через температуру в градусах Фаренгейта выразится как:

$$T(\text{K}) = 255,38 + \frac{5}{9} T(^{\circ}\text{F}) . \quad (1.3)$$

1.3. Классификация средств измерения температуры

Все типы термометров принято разбивать на два класса в зависимости от методики измерений. Традиционный и наиболее массовый вид термометров – **контактные термометры**, отличительной особенностью которых является необходимость теплового контакта между датчиком термометра и средой, температура которой измеряется. Вторую группу составляют **бесконтактные термометры**, для измерения которыми нет необходимости в тепловом контакте среды и прибора, а достаточно измерений собственного теплового или оптического излучения.

Контактные термометры:

- Термометры расширения
- Манометрические термометры
- Термоэлектрические термометры (термопары)
- Термометры сопротивления

Бесконтактные термометры:

- Пирометры
- Радиометры
- Тепловизоры

1.4. Термометры расширения

1.4.1. Жидкостные термометры

Действие стеклянных жидкостных термометров основано на различии коэффициентов теплового расширения термометрического вещества и оболочки, в которой она находится (термометрического стекла или реже кварца). Стеклянные жидкостные термометры отличаются высокой точностью, простотой устройства и дешевизной, однако они хрупки, непригодны для ремонта, и не могут передавать показания на расстояние (за исключением электроконтактных ртутных термометров).

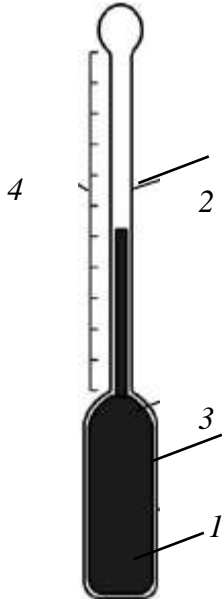


Рис.1 Стеклянный жидкостный термометр:
1 - резервуар; 2 - капилляр;
3 - термометрическая жидкость; 4 - шкала.

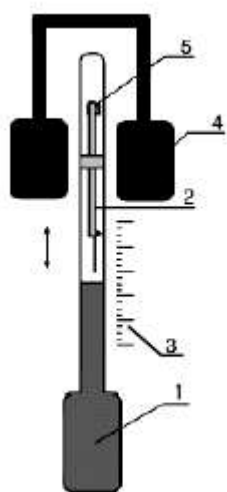
Основными элементами конструкции термометра (рис. 1) является резервуар 1 с припаянным к нему капилляром 2, заполненные частично термометрической жидкостью 3, и шкала 4.

В качестве термометрической жидкости в большинстве случаев используется химически чистая ртуть. Ртуть не смачивает стекло, легко получается в чистом виде, находится в жидком состоянии в широком диапазоне температур (от $-38,84$ до $356,58$ °С).

Еще применяют толуол, этиловый спирт, керосин, петролейный эфир, пентан.

Конструктивно различают палочные термометры и термометры с вложенной шкалой. У палочных термометров шкала наносится на поверхность толстостенного капилляра. У термометров с вложенной шкалой капилляр и шкальная пластинка с нанесенной шкалой заключены в защитную оболочку, припаянную к резервуару.

Показания стеклянного термометра зависят не только от температуры резервуара, но и от температуры столбика жидкости в капилляре, поэтому лабораторные приборы градуируются при полном погружении термометра в измеряемую среду до отсчитываемой температурной отметки. Выпускаются также ртутные электроконтактные термометры (рис.2),



предназначенные для сигнализации или поддержания определенной температуры (с заданным постоянным контактом или с подвижным контактом). Ртуть 1, расширяясь, касается поверхностью контактного проводника 2, положение которого фиксируется специальным устройством 5. Положение проводника можно изменять вращением магнита 4, расположенного снаружи корпуса термометра.

Рис. 2 Электроконтактный жидкостный термометр:

- 1 – резервуар со ртутью;
- 2 – подвижный контакт; 3 – шкала;
- 4 – вращающаяся головка с магнитами;
- 5 – винтовая пара

1.4.2. Дилатометрические термометры

Дилатометрические термометры – средство измерения температуры, использующее преобразование ее изменения в разность удлинений двух твердых тел, обусловленную различием их температурных коэффициентов линейного расширения. Принцип действия дилатометрических датчиков температуры поясняется схемой, приведенной на рис. 3

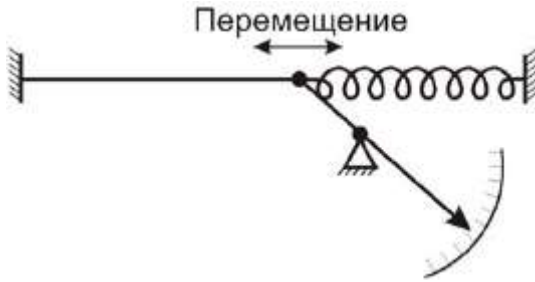
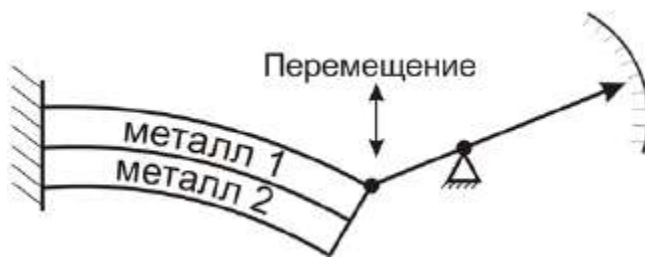


Рис. 3 Схема измерения дилатометрическим термометром

Диапазон измерения термометров от -30 до 1000°C , погрешность $1,5 - 2,5\%$. Они обладают высокой надежностью и используются в релейных схемах.

1.4.3. Биметаллические термометры

Разновидностью дилатометрических термометров являются датчики температуры с биметаллическими пластинами. Используя тот же принцип работы – тепловое расширение тел при нагревании – в биметаллических датчиках измеряется не удлинение, а изгиб пластины, состоящей из двух



металлов с разными температурными коэффициентами расширения. Схема такого датчика, получившего широкое применение в различных системах регулирования температуры, приведена на рис. 4

Рис. 4 Схема измерения биметаллическим термометром

При изменении температуры такой пластины она изгибается в сторону материала с меньшим коэффициентом линейного расширения (на рисунке – металл 2).

Зависимость перемещения незакрепленного конца биметаллической пластины от температуры справедлива в том интервале температур, в котором оба используемых металла обладают упругой деформацией.

Подбором специальных сплавов удается создать биметаллический термометр с рабочим диапазоном температур от -100 до 600°C .

Для увеличения длины пластины при сохранении малых габаритов чувствительного элемента его выполняют в виде спирали.

Наибольшее распространение биметаллические термометры получили для работы при комнатной температуре – как для непосредственного ее измерения, так и для автоматического регулирования (в этом случае чувствительный элемент приводит в действие систему управления контактами реле).

Основная погрешность биметаллических термометров составляет 1-3% диапазона измерения, градуировочная характеристика близка к линейной. Однако чувствительные элементы термометров не взаимозаменяемы и приборы требуют индивидуальной градуировки. Она может осуществляться в термостатах путем сравнения с показаниями соответствующего образцового средства измерений.

1.5. Манометрические термометры

Принцип действия манометрических термометров основан на зависимости давления рабочего вещества в замкнутом объеме (термосистеме) от температуры.

В зависимости от агрегатного состояния рабочего вещества в термосистеме манометрические термометры подразделяют на **газовые, жидкостные и конденсационные**.

Манометрические термометры могут быть использованы для измерения температур от -150 до 600°C . Диапазон измерения определяется наполнителем термосистемы.

Термометры со специальными наполнителями(расплавленными металлами) пригодны для измерения температуры от 100 до 1000°C.

Термосистема термометра (рис.5) состоит из термобаллона 1, капиллярной трубки 3 и манометрической части 2. Вся система прибора (термобаллон, капиллярная трубка, манометрическая пружина) заполнена рабочим веществом. Термобаллон погружается в объект измерения. При изменении температуры рабочего вещества в термобаллоне изменяется давление в замкнутой системе, которое через капиллярную трубку передается на манометрическую часть, представляющую собой манометр с трубчатой пружиной являющийся измерительным прибором манометрического термометра.

Термобаллон представляет собой цилиндр, изготовленный из латуни или специальных сталей, стойких к химическому воздействию измеряемой среды. Диаметр термобаллона находится в пределах от 5 до 30 мм, а его длина 60-500 мм. Капилляр, соединяющий термобаллон с манометрической трубкой, представляет собой медную или стальную трубку с внутренним диаметром 0,1-0,5 мм. Длина капилляра может быть до 60 м. Медные капилляры имеют стальную защитную оболочку, предохраняющую их от повреждения при монтаже и эксплуатации.

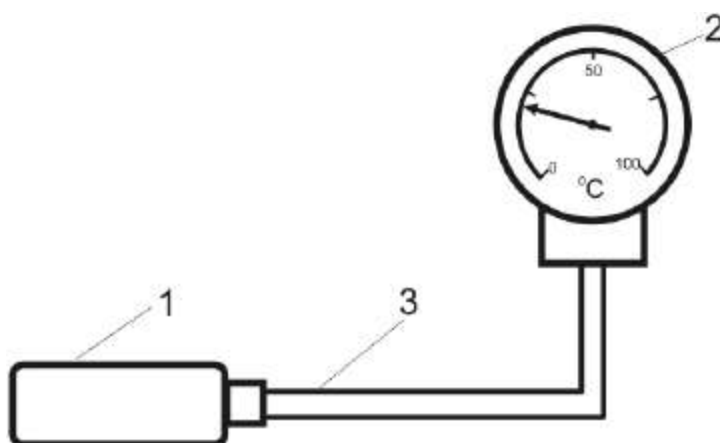


Рис. 5 Манометрический термометр:
1 – термобаллон; 2 – манометрическая часть;
3 – капиллярная трубка

По устройству манометрические термометры всех типов аналогичны. В зависимости от конструкции измерительной системы они бывают показывающими, самопишущими, бесшкальными со встроенными преобразователями для дистанционной передачи показаний.

Манометрические термометры – достаточно простые устройства, позволяющие осуществлять автоматическую регистрацию измерений и передачу показаний на расстояние. Выпускаются термометры с унифицированным пневматическим и электрическим сигналами. Достоинство этих термометров – возможность их использования на взрывоопасных объектах. К недостаткам относят необходимость частой поверки из-за возможной разгерметизации прибора и сложность ремонта, а также довольно большие размеры термобаллона.

1.5.1. Газовые манометрические термометры

Они предназначены для измерения температуры от -50 до 600°C . Термометрическим веществом здесь служит гелий или азот. Для газовых манометрических термометров характерен большой размер термобаллона ($d = 20-30$ мм, $l = 250-500$ мм)

1.5.2. Жидкостные манометрические термометры

В приборах этого типа всю систему термометра заполняют термометрической жидкостью под некоторым начальным давлением. В качестве термометрического вещества в данных термометрах используется ртуть под давлением 10-15 МПа при комнатной температуре или толуол, ксилол, пропиловый спирт, силиконовые жидкости при $P=0,5-5$ МПа. При ртутном заполнении диапазон измерений $-30 \text{ } | \text{ } 600^{\circ}\text{C}$, а для органических жидкостей $-150 \text{ } | \text{ } 300^{\circ}\text{C}$. Так как жидкость практически несжимаема, объем термобаллона в жидкостных термометрах должен быть согласован со свойствами манометрической пружины.

Благодаря большой теплопроводности жидкости термобаллон термометра сравнительно быстро принимает температуру измеряемой среды. Однако по этой же причине погрешности от колебания температуры окружающей среды у жидкостных термометров больше, чем у газовых. При значительной длине капилляра для жидкостных термометров применяют компенсационные устройства в виде биметаллического компенсатора.

Из-за значительного давления в системе, которое предохраняет жидкость от закипания, погрешность от изменения барометрического давления в этих термометрах отсутствует.

Манометрическим жидкостным термометрам свойственна гидростатическая погрешность, вызванная различным положением манометра относительно термобаллона. Эта погрешность устраняется после монтажа прибора путем смещения указателя прибора на нужное значение по шкале.

1.5.3. Конденсационные манометрические термометры

В качестве манометрического вещества в этих термометрах используются легкокипящие жидкости (пропан, этиловый эфир, ацетон, толуол, хлористый метил и т.д.). Диапазон измерения $-50 \text{ } \beta \text{ } 50^{\circ}\text{C}$. Специально изготовленные термометры применяются для измерения сверхнизких температур от 0,8 К.

Термобаллон термометра заполнен конденсатом примерно на 70-75% объема, а над конденсатом находится насыщенный пар этой же жидкости. Капилляр опущен в термобаллон так, что его конец находится в жидкости и в том случае, когда при максимальной температуре в термобаллоне остается часть жидкости.

Принцип работы конденсационных термометров основан на зависимости давления P насыщенного пара низкокипящих жидкостей от температуры.

Давление в термосистеме конденсационного термометра равно давлению насыщенного пара при температуре рабочей жидкости, которая в свою очередь равна температуре измеряемой среды.

Давление в термосистеме зависит только от измеряемой температуры t , изменение температуры окружающей среды не оказывает влияния на показание прибора.

Поскольку термобаллон может быть выполнен малых размеров, то конденсационные термометры менее инерционны, чем другие манометрические термометры. Кроме того, эти термометры более чувствительны, т.к. давление насыщенного пара резко меняется с температурой.

Конденсационным термометрам присущи гидростатическая погрешность и погрешность от изменения барометрического давления. Первая компенсируется аналогично жидкостным термометром, а вторая значительна лишь на начальном участке шкалы, когда давление в термосистеме невелико.

1.6. Термоэлектрические термометры

1.6.1. Основные понятия и определения

Измерение температуры термоэлектрическими термометрами основано на **термоэлектрического эффекта**, заключающегося в генерировании термоэлектродвижущей силы (термо-ЭДС), возникающей из-за разности температур между двумя соединениями различных металлов или сплавов, образующих часть одной и той же цепи.

В простейшем случае, если цепь состоит из 2-х разнородных материалов, то она носит название **термопары**.

Под **термоэлектрическим термометром** принято понимать комплект, состоящий из:

- 1) термопары, осуществляющей преобразование температуры в электрическое напряжение;
- 2) линий связи (удлиняющих проводов);
- 3) вторичного прибора для измерения термо-ЭДС.

1.6.2. Принцип действия

Термопара представляет собой цепь, состоящую из двух соединенных между собой разнородных проводников **A** и **B** (рис.6). Эти проводники называются **термоэлектродами**, места соединения термоэлектродов – **спаями**. Спай с температурой t , погружаемый в измеряемую среду, называется **рабочим (измерительным)** спаем термопары, второй спай с температурой t_0 носит название **свободного (соединительного)**.

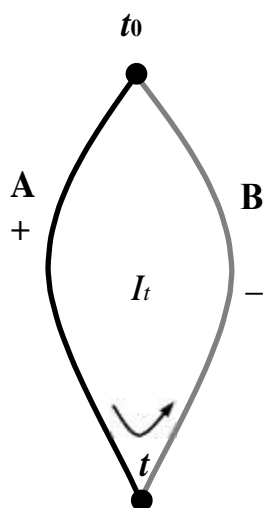


Рис. 6 Схема контура термопары

Возникновение термотоков объясняется следующим: при соединении одинаково нагретых концов двух проводников из разнородных материалов, из которых в первом количество свободных электронов в единице объема больше, чем во втором, последние будут диффундировать из первого проводника во второй в большем числе, чем обратно. Таким образом, первый проводник станет заряжаться положительно, а второй – отрицательно. Образующееся при этом в месте соединения проводников электрическое поле будет противодействовать этой диффузии, в результате чего наступит состояние подвижного равновесия, при котором между свободными концами указанных проводников появится некоторая разность потенциалов (термо-ЭДС). С увеличением температуры проводников значение этой термо-ЭДС также увеличивается. Кроме того, термо-ЭДС возникает и между концами однородного проводника, имеющими разные температуры. В этом случае до наступления состояния подвижного равновесия положительно заряжается более нагретый конец проводника как обладающий большей концентрацией свободных электронов по сравнению с концом, менее нагретым. Возрастание разности температур между концами проводника приводит к увеличению возникающей в нем термо-ЭДС.

Так два этих фактора – контактная разность потенциалов и диффузия электронов – являются слагаемыми результирующей термо-ЭДС цепи, значение которой зависит от природы термоэлектродов и разности температур спаев ТЭП.

Конструктивно термоэлектрический преобразователь представляет собой две проволоки из разнородных материалов, нагреваемые концы которых скручиваются, а затем свариваются или спаиваются. Конструктивное оформление термопар разнообразно. На рис 7 представлена конструкция термопары, которая чаще всего используется для измерения температуры в трубопроводах и других аппаратах, находящихся под давлением.

Для защиты от механических повреждений и воздействия среды, температура которой измеряется, электроды ТЭП, армированные изоляцией, помещаются в специальную защитную арматуру. У рабочих преобразователей, применяемых для измерения температуры различных сред, арматура состоит из защитного чехла 1, неподвижного или передвижного штуцера 5 с сальниковым уплотнением (на рисунке не показано) и головки 7, прочно присоединенной к защитному чехлу. В головке, снабженной крышкой 8 и штуцером под кабель 9, помещена розетка 6 из изоляционного материала с клеммами для присоединения термоэлектродов 2 и проводов, соединяющих термопару с измерительным прибором или преобразователем.

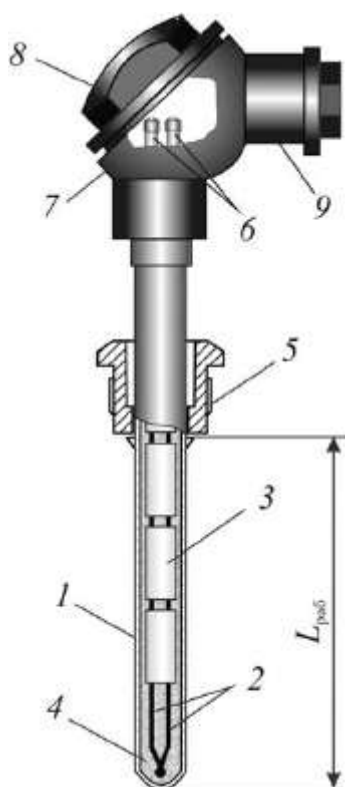


Рис. 7 Конструкция термопары:

- 1 – защитный чехол; 2 – термоэлектроды;
- 3 – изоляционные бусы; 4 – порошок;
- 5 – штуцер; 6 – розетка с клеммами;
- 7 – головка; 8 – крышка; 9 – штуцер под кабель

В качестве изоляции термоэлектродов термометра применяются одно- или двухканальные трубки или бусы 3 из фарфора (при температуре до 1300 °С) и окислов алюминия, магния или бериллия (свыше 1300 °С), надеваемые на термоэлектроды. Свободное пространство между термоэлектродами и защитным чехлом заполнено порошком окиси алюминия 4 для улучшения теплопередачи.

Длина монтажной (рабочей) части $L_{\text{раб}}$, погружаемой в среду, температуру которой измеряют, выполняется различной для каждого конкретного типа ТЭП.

Рабочий конец термопары можно выполнять путем сварки, пайки или скрутки. Наибольшее распространение получил способ изготовления спая с помощью сварки, а пайку применяют только в специальных случаях. Скрутку рабочего конца часто применяют для термоэлектрических термометров вольфрамиевой и вольфраммолибденовой групп. Сварку электродов ТЭП производят как с предварительной скруткой термоэлектродов, так и без скрутки. Еще одним вариантом изготовления спая рабочего конца является приварка электродов к дну защитного чехла.

Выпускаются **одинарные** (с одним чувствительным элементом) и **двойные** (с двумя чувствительными элементами) термоэлектрические преобразователи различных типов. Двойные термопары применяются для измерения температуры в одном и том же месте одновременно двумя вторичными приборами, установленными в разных пунктах наблюдения. Они содержат два одинаковых чувствительных элемента, заключенных в общую арматуру. Термоэлектроды их изолированы друг от друга и защитного чехла.

В настоящее время во всём мире широкое распространение получили термоэлектрические преобразователи, изготавливаемые из **термопарного кабеля** (рис. 2.13). Он представляет собой гибкую металлическую трубку с расположенными внутри неё одной или двумя парами термоэлектродов, расположенными параллельно друг другу. Пространство вокруг термоэлектродов заполнено сильно уплотнённой мелкодисперсной минеральной изоляцией.

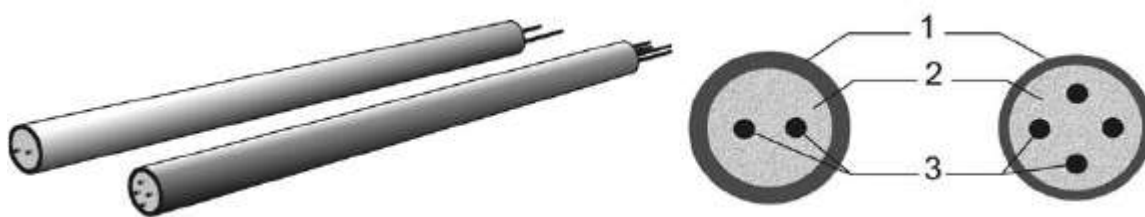


Рис. 2.13. Термопарный кабель с одной или двумя парами термоэлектродов:
1 - оболочка кабеля; 2 - минеральная изоляция (MgO); 3 – термоэлектроды

В РФ выпускают термопарный кабель с двумя типами термоэлектродов: КТМС-ХА и КТМС-ХК (кабель термопарный с минеральной изоляцией в стальной оболочке с хромель-алюмелевыми или хромель-копелевыми термоэлектродами) диаметром от 0,9 до 7,2 мм с изоляцией из электротехнического периклаза. Оболочка кабеля изготовлена из жаростойкой стали или сплава. Термопарный кабель за счёт высокой плотности заполнения периклазом выдерживает изгиб на 180° вокруг цилиндра диаметром, равным пятикратному диаметру кабеля.

К достоинствам кабельных термопар можно отнести:

- более высокие термоэлектрическая стабильность и рабочий ресурс по сравнению с проволочными термопреобразователями (в 2-3 раза);
- возможность изгиба, монтажа в труднодоступных местах, в кабельных каналах, при этом длина ТП может достигать 60-100 метров. Термопары можно приваривать, припаивать или просто прижимать к поверхности для измерения её температуры;

- малый показатель тепловой инерции, позволяющий применять их для регистрации быстропротекающих процессов;
- универсальность применения для различных условий эксплуатации, хорошая технологичность, малая материалоемкость;
- способность выдерживать большие рабочие давления;
- возможность изготовления на их основе термопреобразователей в защитных чехлах блочно-модульного исполнения, обеспечивающих дополнительную защиту термоэлектродов от воздействия рабочей среды и создающих возможность оперативной замены чувствительного элемента.

1.6.3. Основные источники погрешности при измерении температуры с помощью термопар

Среди источников погрешностей можно выделить как явления, специфичные только для термопар, так и общие (шумы и помехи), характерные для любых измерительных систем. Рассмотрим кратко эти явления и методы их нейтрализации.

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.

Шунтирование термопары и гальванический эффект.

При высоких температурах электрическое сопротивление материалов изоляционных оболочек термоэлектродов снижается и может стать меньше омического сопротивления самих электродов. Это эквивалентно включению в цепь термопары шунтирующего резистора и образованию

нового паразитного спая, имеющего температуру, отличную от измеряемой.

Также при высоких температурах, особенно при измерении температуры жидкости, возможно образование (проникновение) электролита внутрь термопары и возникновение гальванического эффекта, также приводящего к ошибкам измерения.

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 измерительного устройства следует использовать располагаемые в непосредственной близости от термопар специальные модули нормализации сигналов, превращающие термо-ЭДС 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 окупаются надежностью, точностью и стабильностью работы системы.

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.

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.

6) Использовать проводники, не отводящие тепло от измеряемой зоны.

1.7. Термопреобразователи сопротивления

1.7.1. Принцип действия

Действие термопреобразователей сопротивления (термометров сопротивления) основано на свойстве металлов и полупроводников изменять свое электрическое сопротивление с изменением температуры.

Известно, что подавляющее большинство металлов имеет положительный температурный коэффициент электрического сопротивления. Это связано с тем, что число носителей тока – электронов проводимости – в металлах очень велико и не зависит от температуры. Электрическое сопротивление металла увеличивается с повышением температуры в связи с возрастающим рассеянием электронов на неоднородностях кристаллической решетки, обусловленным увеличением тепловых колебаний ионов около своих положений равновесия. В полупроводниках наблюдается иная картина – число электронов проводимости резко возрастает с увеличением температуры. Поэтому электрическое сопротивление типичных полупроводников столь же резко (обычно по экспоненциальному закону) уменьшается при их нагревании. При этом температурный коэффициент электрического сопротивления полупроводников на порядок выше, чем у чистых металлов.

Термометры сопротивления широко применяются для измерения температуры в интервале от -260 до 850 °С. В отдельных случаях они могут быть использованы для измерения температур до 1000 °С.

К числу достоинств металлических термометров сопротивления следует отнести:

- высокую степень точности измерения температуры;
- возможность выпуска измерительных приборов к ним со стандартной градуировкой шкалы практически на любой температурный интервал;
- возможность централизации контроля температуры путем присоединения нескольких взаимозаменяемых термометров сопротивления через переключатель к одному измерительному прибору.

К недостаткам термометров сопротивления относится потребность в постоянном источнике тока.

1.7.2. Типы термопреобразователей сопротивления

К металлическим проводникам термопреобразователя сопротивления предъявляется ряд требований:

- 1) стабильность градуировочной характеристики;
- 2) воспроизводимость, обеспечивающая взаимозаменяемость изготавливаемых термопреобразователей сопротивления;
- 3) нечувствительность к малым примесям;
- 4) линейность функции $R_t = f(t)$;
- 5) высокое значение температурного коэффициента электрического сопротивления;
- 6) большое удельное сопротивление;
- 7) невысокая стоимость материала.

Исследования установили, что чем чище металл, тем более он отвечает указанным требованиям и тем больше отношение R_{100} / R_0 и температурный коэффициент электрического сопротивления α , где R_{100} и R_0 - сопротивления материала при температуре 100 и 0°C соответственно. При снятии механических напряжений в металле путем его отжига, эти характеристики достигают максимального значения для данного металла.

Из числа чистых металлов наиболее пригодными для изготовления термометров сопротивления являются платина (Pt) и медь (Cu), хотя выпускаются термометры сопротивления, выполняемые из никеля, железа, свинца, вольфрама, но в нашей стране они не получили широкого распространения.

Платина является наилучшим материалом для термометров сопротивления, так как легко получается в чистом виде, обладает хорошей воспроизводимостью, химически инертна в окислительной среде при высоких температурах, имеет достаточно большой температурный коэффициент и высокое удельное сопротивление.

Платиновые термометры сопротивления используются в качестве рабочих образцов эталонов. Недостатком платины является нелинейность функции $R_t = f(t)$, кроме того, платина очень дорогой металл.

Медь - недорогостоящий материал, легко получаемый в чистом виде, но при высоких температурах медь быстро окисляется.

1.7.3. Конструкция термопреобразователей сопротивления

Термомопреобразователи сопротивления имеют специальную арматуру, сходную, в основном, с арматурой термопар. Так же, как и у термопар, в существующее номенклатуре представлено большое количество различных вариантов конструктивного исполнения термометров сопротивления. На рис 8 представлена конструкция термометра сопротивления, которая чаще всего используется для измерения температуры в трубопроводах и других аппаратах, находящихся под давлением.

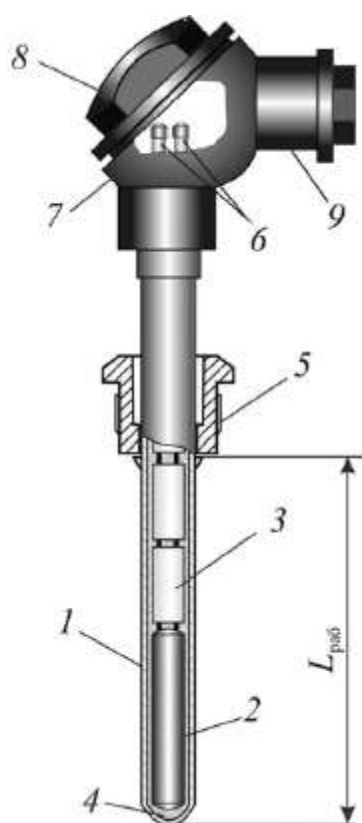


Рис. 8 Конструкция термопреобразователя сопротивления:

1 – защитный чехол; 2 – чувствительный элемент; 3 – изоляционные бусы;
4 – порошок; 5 – штуцер; 6 – розетка с клеммами; 7 – головка; 8 – крышка;
9 – штуцер под кабель

Для защиты от механических повреждений и воздействия среды, температура которой измеряется, чувствительный элемент 2 и удлиняющие провода, армированные изоляцией, помещаются в специальную защитную арматуру. Арматура состоит из защитного чехла 1, неподвижного или передвижного штуцера 5 с сальниковым уплотнением (на рисунке не показано) и головки 7, прочно присоединенной к защитному чехлу.

В головке, снабженной крышкой 8 и штуцером под кабель 9, помещена розетка б из изоляционного материала с клеммами для присоединения удлиняющего кабеля, соединяющего термометр сопротивления с измерительным прибором или преобразователем. В качестве изоляции удлиняющих проводов термометра применяются одно- или двухканальные трубки или бусы 3, выполненные из фарфора или ПВХ. Свободное пространство защитного чехла заполнено порошком окиси алюминия 4 для улучшения теплопередачи.

На рис. 9 показана конструкция чувствительного элемента платинового и медного термометров сопротивления. Чувствительный элемент платинового термометра сопротивления (рис. 9, а) представляет собой платиновую спираль 1 из тонкой проволоки, помещенную в капиллярные каналы керамического каркаса 4. К двум верхним концам этих спиралей припаяны платиновые или иридиевые выводы 2, к которым привариваются удлиняющие проводники. Для крепления платиновых спиралей и выводов в керамическом каркасе используют глазурь или термоцемент 3. Пространство между платиновыми спиралью и стенками каналов каркаса заполнено порошком окиси алюминия, который служит изолятором и улучшает тепловой контакт между спиралью и каркасом.

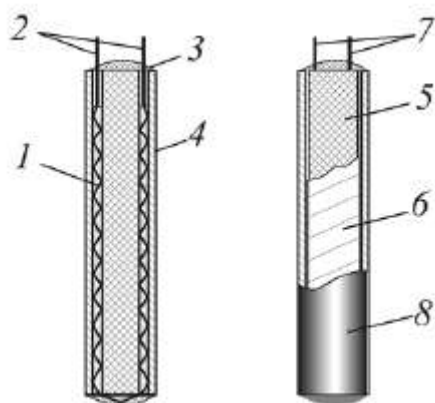


Рис.9 Конструкция чувствительного элемента:

а – платинового ТС; б – медного ТС.

1 – платиновая спираль; 2, 7 – выводы; 3 – термоцемент; 5 – медная проволока; 6 – фторопластовая пленка; 8 – металлическая гильза

Чувствительный элемент медного термометра сопротивления (рис. 9, б) представляет собой многослойную безиндукционную обмотку 5 из медной изолированной проволоки (диаметром 0,08 мм), намотанную на цилиндрический каркас из пластмассы и герметизированную с помощью фторопластовой пленки 6 (или слоя лака). К концам обмотки припаяны медные выводы 7. Собранный чувствительный элемент помещается в металлическую гильзу 8, засыпается керамическим порошком и герметизируется.

Длина чувствительного элемента у платиновых термометров сопротивления составляет 30 – 120 мм, у медных – 60 мм.

Термометры сопротивления бывают одинарные и двойные, т.е. с одним и двумя чувствительными элементами. В последнем случае в общем защитном чехле расположены два одинаковых чувствительных элемента, подключаемых к двум отдельным вторичным приборам, установленным в разных местах.

К числу достоинств металлических термометров сопротивления следует отнести:

- высокую степень точности измерения температуры;
- возможность выпуска измерительных приборов к ним со стандартной градуировкой шкалы практически на любой температурный интервал;
- возможность централизации контроля температуры путем присоединения нескольких взаимозаменяемых термометров сопротивления через переключатель к одному измерительному прибору.

К недостаткам термометров сопротивления относится потребность в постоянном источнике тока.

1.8. Бесконтактные методы измерения температуры

О температуре нагретого тела можно судить на основании измерения параметров его теплового излучения, представляющего собой электромагнитные волны различной длины. Чем выше температура тела, тем больше энергии оно излучает. Тепловые лучи испускаются всеми нагретыми физическими телами, которые при температурах около 500 - 600°С начинают испускать излучение, видимое человеческим глазом, причем яркость свечения нагретых тел быстро возрастает с повышением температуры.

Накаленные твердые тела испускают сплошной спектр излучения, состоящий из электромагнитных волн различной длины. Видимое человеческим глазом электромагнитное излучение, называемое светом, представляет собою лишь весьма узкий диапазон спектра шириной 0,35 мкм с длинами волн от 0,40 до 0,75 мкм. Невидимые лучи с большей длиной волны (более 0,75 мкм) относятся к инфракрасному участку спектра излучения, охватывающему диапазон от 0,75 до 400 мкм, за которым инфракрасный участок спектра постепенно переходит в диапазон радиоволн. Невидимые лучи с меньшей длиной волны (менее 0,40 мкм) относятся к ультрафиолетовому участку спектра излучения.

В области температурных измерений используют в основном диапазон инфракрасных и видимых лучей.

Термометры, действие которых основано на измерении теплового излучения, называют **пирометрами**. Они позволяют контролировать температуру от 100 до 6000⁰С и выше. Одним из главных достоинств данных устройств является отсутствие влияния измерителя на температурное поле нагретого тела, так как в процессе измерения они не вступают в непосредственный контакт друг с другом. Поэтому данные методы получили название бесконтактных.

Все приборы, измеряющие температуру бесконтактным методом, т.е. дистанционно, обладают следующими преимуществами по сравнению с приборами, измеряющими температуру контактными методами:

- 1) имеют принципиально неограниченный верхний температурный предел измерения;
- 2) обеспечивают возможность измерения температур излучателей, находящихся на большом расстоянии от пирометра;
- 3) не искажают температурное поле объекта измерения;
- 4) могут применяться для измерения температур газовых потоков при больших скоростях.

На основании законов излучения разработаны пирометры следующих типов:

1. пирометр частичного излучения (ПЧИ) – измеряется энергия в ограниченном фильтром (или приемником) участке спектра;
2. пирометр спектрального отношения (ПСО) – измеряется отношение энергии фиксированных участков спектра;
3. пирометр суммарного излучения (ПСИ) – измеряется полная энергия излучения;

1.8.1. Пирометры частичного излучения

К данному типу пирометров, измеряющих яркостную температуру объекта, относятся оптические (квазимонохроматические) и фотоэлектрические пирометры, измеряющие энергию потока в узком диапазоне длин волн.

Наиболее распространенным прибором этой группы является квазимонохроматический пирометр с исчезающей нитью (рис.10).

Принцип действия квазимонохроматических пирометров основан на сравнении яркости монохроматического излучения двух тел: эталонного тела и тела, температуру которого измеряют. В качестве эталонного тела обычно используют нить лампы накаливания, яркость излучения которой регулируют.

Пирометр представляет собой телескопическую трубку с линзой 1 объектива и линзой 4 окуляра. Внутри телескопической трубки в фокусе линзы объектива находится лампа накаливания 3 с подковообразной нитью.

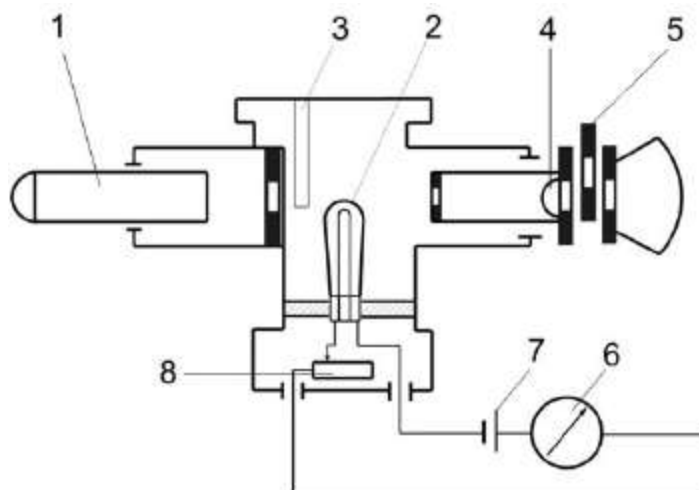


Рис.10 Принципиальная схема квазимонохроматического (оптического) пирометра с исчезающей нитью:

1-линза; 2-поглощающий светофильтр; 3-лампа накаливания; 4-линза окуляра; 5-красный светофильтр; 6-милливольтметр; 7-источник тока; 8-реостат

Лампа питается от источника тока 7 через реостат 8. В цепь питания лампы включен милливольтметр 6, конструктивно объединенный с трубкой телескопа. Шкала милливольтметра отградуирована в градусах температуры. Для получения монохроматического света окуляр снабжен красным светофильтром 5, пропускающим только лучи определенной длины волны. В объективе находится серый поглощающий светофильтр 2, слу-

жащий для расширения пределов измерения.

Объектив и окуляр прибора могут перемещаться вдоль оси в телескопической трубке, что позволяет получить резкое изображение раскаленного тела и нити. При подготовке оптической системы к измерению трубку наводят на тело и передвигают объектив до получения четкого изображения тела и нити лампы (в виде резкой черной подковки). Включив источник тока, реостатом регулируют яркость нити до тех пор, пока средняя часть ее не сольется с освещенным телом. В этот момент по шкале милливольтметра отсчитывают температуру тела.

Стабильность показаний пирометра с исчезающей нитью зависит, главным образом, от постоянства характеристик измерительного прибора и лампы. Лампа с вольфрамовой нитью в течение очень длительного периода сохраняет присущую ей зависимость яркости нити от силы протекающего через нее тока, если температура не превышает 1400°C . Нагрев до температуры выше 1400°C приводит к распылению вольфрамовой нити и изменению ее сопротивления; возгоняющийся вольфрам оседает на стенках колбы лампы и образует темный налет. По этим причинам яркостная характеристика лампы изменяется. 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°C нить лампы накаливания нагревалась до яркостных температур не выше 1400°C . В соответствии с этим милливольтметр снабжают двумя шкалами: верхней – для измерения температур от 800 до 1400°C с выведенным серым светофильтром и нижней – для температур выше 1300°C с введенным серым светофильтром.

Приборостроительная промышленность выпускает переносные пирометры с исчезающей нитью в различном конструктивном оформлении для температур от 800°C до нескольких тысяч градусов. Пирометры работают с эффективной длиной волны $0,65$ или $0,66$ мкм.

1.8.2. Пирометры спектрального отношения (цветовые)

В цветковых пирометрах, применяемых для промышленных измерений, определяется отношение спектральной энергетической яркости (СЭЯ) реального тела в лучах двух заранее выбранных длин волн, т. е. показания пирометра являются функцией $f(E_{\lambda_1}/E_{\lambda_2})$. Это отношение для каждой температуры различно, но вполне однозначно.

В большинстве случаев для реальных тел кривые $E_{\lambda} = f(\lambda)$ при различных температурах совершенно подобны кривым для абсолютно черного тела; поэтому практически не требуется вводить поправки на неполноту излучения, что является основным преимуществом цветкового пирометра. Вторым важным преимуществом цветковых пирометров по сравнению с радиационными и яркостными является независимость результата измерения от расстояния до объекта измерения и от поглощения радиации в среде. Большая часть конструкций цветковых пирометров основана на определении цвета измеряемого тела по отношению энергетических яркостей для двух длин волн, не очень близких одна к другой в видимой части спектра. Чтобы избежать зависимости результатов измерения от субъективных особенностей наблюдателя (цветочувствительность и утомляемость глаза), в цветковых пирометрах для измерения отношения энергетических яркостей используют фотоэлементы.

Измеряемое излучение через защитное стекло 1 (рис. 11) и объектив 2 попадает на фотоэлемент 4.

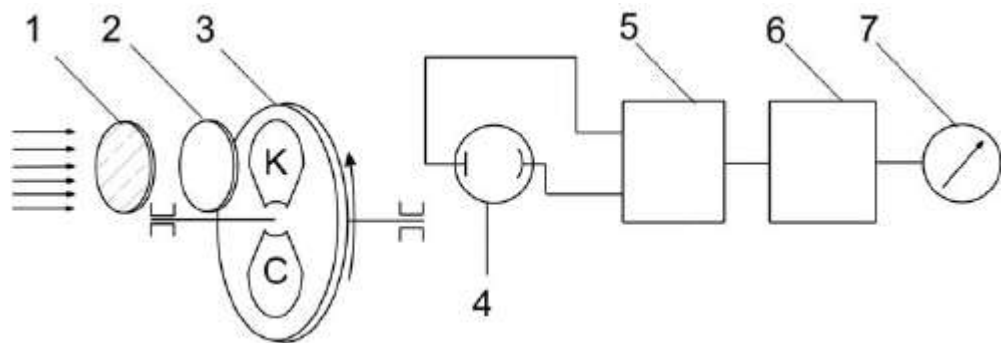


Рис.11. Принципиальная схема пирометра спектрального отношения с фотоэлементом:

- 1-защитное стекло; 2-объектив; 3-обтюратор; 4-фотоэлемент;
- 5-электронный усилитель; 6-логарифмирующее устройство;
- 7-милливольтметр

Между объективом и фотоэлементом установлен обтюратор 3, вра-

щаемый синхронным двигателем. Обтюратор выполнен в виде диска с двумя отверстиями, одно из которых закрыто красным светофильтром К, другое – синим С. Таким образом, при вращении обтюратора на фотоэлемент попеременно попадают излучения соответствующей СЭЯ. Спектральная характеристика фотоэлемента зависит от температуры, поэтому фотоэлемент в пирометре заключен в термостат с автоматическим регулированием.

Электрический ток, напряжение которого пропорционально соответствующим СЭЯ предварительно усиливается электронным усилителем 5 и преобразуется специальным электронным логарифмирующим устройством 6 в постоянный ток; сила постоянного тока зависит от $1/T$. Сила тока логарифмирующего устройства измеряется указывающим или регистрирующим милливольтметром 7.

Предел измерения пирометров составляет от 300 до 2800°C, основная погрешность при измерении температуры физических тел не превышает $\pm 1\%$ от верхнего предела измерений.

Имеются цветные пирометры с дифференциальной измерительной схемой, включающей два фотоэлемента.

1.8.3. Пирометры полного излучения (радиационные)

Пирометры полного излучения измеряют радиационную температуру тела, поэтому их часто называют радиационными (или радиометрами). Принцип действия данных измерителей температуры основан на использовании закона Стефана-Больцмана.

Пирометр снабжен оптической системой (линзой, зеркалом), 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. В качестве измерительных приборов применяют милливольтметры,

автоматические потенциометры и уравновешенные мосты.

Пирометр с термобатареей (рис. 12) состоит из телескопа с линзой 1 объектива и линзой 2 окуляра. На пути лучей линзы 1 установлена диафрагма 3, а в фокусе линзы объектива – термoeлектрическая батарея 4.

Рабочие спаи ТЭП прикреплены к крестообразной пластинке из платиновой фольги, покрытой платиновой чернью для лучшего поглощения падающих лучей. Свободные концы ТЭП термометров укреплены на слюдяной пластинке, а соединительные провода выведены к клеммам, находящимся в корпусе телескопа. Перед окулярной линзой помещено цветное стекло 5 для защиты глаз при установке пирометра. Температура рабочих концов термобатарей не должна превышать 250 °С. Для уменьшения числа лучей, падающих на термобатарею, служит диафрагма 3.

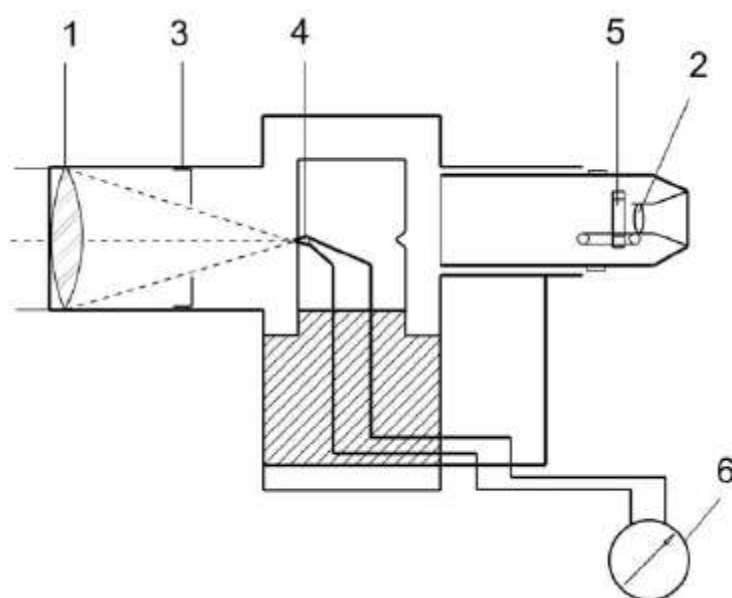


Рис.12. Принципиальная схема пирометра полного излучения с термобатареей в стеклянном баллончике:

1,2-линзы; 3-диафрагма; 4-батарея; 5-цветное стекло;
6 - милливольтметр.

Вид материала линзы определяет интервал измеряемых температур и градуировочную характеристику. Стекло из флюорита обеспечивает возможность измерения низких температур начиная с 100⁰С, кварцевое стекло используется для температуры 400 - 1500⁰С, а оптическое стекло для температур 950⁰С и выше.

Данными пирометрами измеряют температуру от 100 до 3500⁰С. Основная допустимая погрешность технических промышленных пирометров возрастает с увеличением верхнего предела измерения и для температур 1000, 2000 и 3000⁰С составляет соответственно ±12; ±20 и ±35⁰С.

Точный учет количества поступающей в приемник лучистой энергии крайне сложен, так как между теплоприемником и окружающей средой происходит теплообмен, поэтому прибор может иметь не поддающиеся учету погрешности. Несмотря на эти недостатки, пирометры полного излучения широко применяют в производственной практике; они могут быть установлены стационарно, позволяют применять дистанционную передачу, автоматически записывать и регулировать температуру.

1.8.4. Тепловизоры

Тепловидение – это направление в технических измерениях, изучающее физические основы, методы и приборы, обеспечивающие возможность наблюдения слабонагретых объектов. Приборы, работающие в этом направлении называются тепловизорами (термографами). Тепловизоры относятся к оптико-электронным приборам пассивного типа, работающие в инфракрасном диапазоне спектра излучения.

Диапазон инфракрасного излучения делится на несколько поддиапазонов (табл.2.5).

Таблица 2.5

Длина волн (мкм)	Название поддиапазона
0.76-1.5	Ближнее инфракрасное излучение
1.5-5.5	Коротковолновое инфракрасное излучение
5.6-25	Длинноволновое инфракрасное излучение
25-100	Дальнее инфракрасное излучение

Принцип их действия основан на преобразовании инфракрасного излучения в электрический сигнал, который подвергается усилению и автоматической обработке, а затем преобразуется в видимое изображение теплового поля объекта (термограмму) для его визуальной и количественной оценки.

Общий принцип устройства тепловизора представлен на рис.13

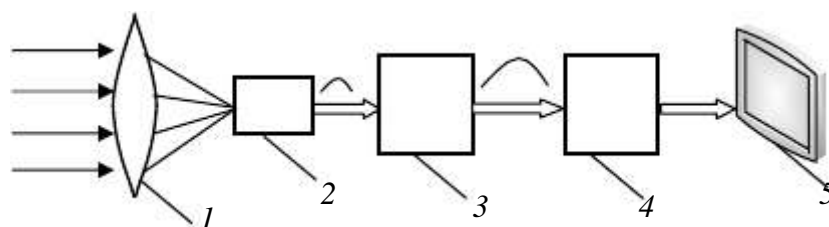


Рис. 13. Структурная схема тепловизора:
 1 – линза; 2 – фотоприемник; 3 – электронный усилитель; 4 – микро-
 процессор; 5 – блок отображения информации

Инфракрасное излучение концентрируется системой специальных линз *1* и попадает на фотоприемник *2*, который избирательно чувствителен к определенной длине волны инфракрасного спектра. Попадаемое на него излучение приводит к изменению электрических свойств фотоприемника, регистрируется и усиливается электронным усилителем *3*. Полученный сигнал подвергается цифровой обработке в микропроцессорном блоке *4* и это значение передается на блок отображения информации *5*, представляющий собой экран жидкокристаллического дисплея. Блок отображения информации имеет цветовую палитру, в которой каждому значению сигнала присваивается определенный цвет. После этого на экране монитора появляется точка, цвет которой соответствует численному значению инфракрасного излучения, которое попало на фотоприемник. Сканирующая система (зеркала или полупроводниковая матрица) проводит последовательный обход всех точек в пределах поля видимости прибора, в результате получается видимая картина инфракрасного излучения объекта. Чувствительность детектора к тепловому излучению тем выше, чем ниже его собственная температура, поэтому его помещают в специальное термостатирующее холодильное устройство. Один из способов охлаждения осуществляется посредством элементов Пельтье (полупроводники, дающие перепад температур (тепловой насос) при пропускании через них тока).

Таким образом, на экране тепловизора видны значения мощности инфракрасного излучения в каждой точке поля зрения тепловизора, отображенные согласно заданной цветовой палитре (черно-белой или цветной).

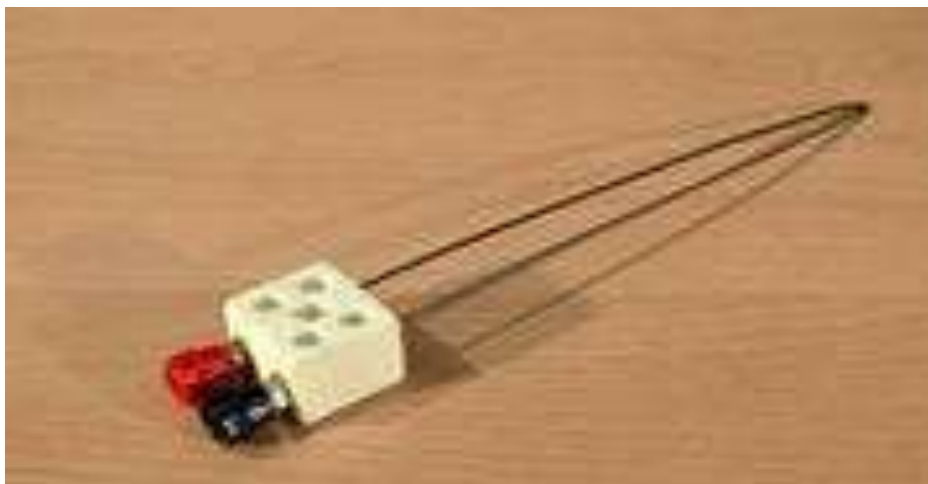
Контрольные вопросы

1. Дайте определение понятию «температура».
2. Перечислите основные виды температурных шкал.
3. Что такое реперная точка?
4. Приведите классификацию средств измерения температуры.
5. В чем состоит принцип действия жидкостных термометров?
6. Чем отличаются биметаллические термометры от дилатометрических?
7. Укажите основные конструктивные части манометрических термометров?
8. Укажите типы манометрических термометров.
9. Дайте определение понятию «термоэлектрический эффект».
10. Поясните принцип действия термопары.
11. Что такое холодный и горячий спай термопары?
12. Как подбираются компенсационные термоэлектродные провода для термопары?
13. Назовите основные термоэлектродные материалы и типы термопар.
14. У какого из типов термопар градуировочная характеристика близка к линейной?
15. Поясните конструкцию стандартной термопары.
16. Что такое термопарный кабель?
17. Укажите основные источники погрешности при измерении температуры с помощью термопар.
18. Поясните принцип действия термометра сопротивления.
19. Назовите основные материалы для изготовления термометров сопротивления.
20. Поясните конструкцию термометра сопротивления.
21. Какой из термометров сопротивления имеет наибольший диапазон измерения?
22. Перечислите бесконтактные методы измерения температуры.
23. Назовите преимущества бесконтактных методов измерения температуры.
24. Какие виды излучений испускает нагретое тело?
25. Какой из типов пирометров измеряет яркостную температуру тела?
26. Поясните принцип действия квазимонохроматического пирометра.

27. Укажите основные преимущества цветковых пирометров.
28. Поясните принцип действия пирометра спектрального отношения.
29. Что такое радиационная температура?
30. Поясните принцип действия пирометра полного излучения.
31. Что такое тепловизоры?
32. Поясните принцип действия тепловизора.

ТЕСТ №1

1. Классификация термометров по методу измерений
 - А) контактные
 - Б) косвенные
 - В) бесконтактные
2. Как называют термометры, принцип действия которых основан на изменении давления рабочего вещества в зависимости от температуры?
 - А) термометры расширения
 - Б) термометры сопротивления
 - В) манометрические термометры
3. Какая жидкость используется в жидкостных термометрах?
 - А) ацетон
 - Б) керосин
 - В) жидкий азот
4. К какому типу относят манометрический термометр, если термометрическим веществом в нем является азот?
 - А) жидкостным
 - Б) газовым
 - В) конденсационным
5. Какой объем термобаллона термометра занимает конденсат?
 - А) $2/3$
 - Б) $1/3$
 - В) 1
6. Чувствительный элемент термометра сопротивления изготавливают из:
 - А) вольфрама
 - Б) меди
 - В) платины
7. Пирометр - прибор для измерения температуры:
 - А) Косвенным методом
 - Б) Контактным методом
 - В) Бесконтактным методом
8. Какой прибор изображен на рисунке?



- А) Термометр сопротивления
- Б) Термопара
- В) Биметаллический термометр

9. Какой прибор изображен на рисунке?



- А) Термопара
- Б) Пирометр
- В) Манометрический термометр

10. Какой прибор изображен на рисунке?



- A) Термопара
- Б) Пирометр
- В) Манометрический термометр

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Баранов И. Н. Создание полупроводниковых датчиков давлений на основе структуры "кремний на диэлектрике" // Автоматизация и управление в технических системах, 2005. - Вып. 24.
2. Бармин А.В. Радарные системы контроля уровня. //Современные технологии автоматизации. №4, 2002.
3. Белевцев А. и др. Термоэлектрические преобразователи температуры. Теория, практика, развитие. //Современные технологии автоматизации. №2, 2004.
4. Гордов А.Н., Жагулло О.М., Иванова А.Г. Основы температурных измерений. - М., Энергоатомиздат, 1992.
5. Государственный стандарт РФ ГОСТ 8.585-2001. Термопары. Номинальные статические характеристики преобразования. – Москва: Госстандарт России, 2001.
6. Гуртовцев А. Измерение давления в автоматизированных системах. //Современные технологии автоматизации. №4, 2001.
7. Жданкин В.К. Сигнализаторы изменения уровня. //Современные технологии автоматизации. №2, 2002.
8. Кулаков М.В. Технологические измерения и приборы для химических производств: Учебник.- 4-е изд., стер.- М.: Альянс, (гриф МО), 2008.
9. Межгосударственный стандарт ГОСТ 8.586.1-2005. Измерение расхода и количества жидкостей и газов с помощью стандартных сужающих устройств. Часть 1. Принцип метода измерений и общие требования – М.: Стандартинформ, 2007.
10. Межгосударственный стандарт ГОСТ 8.586.2-2005. Измерение расхода и количества жидкостей и газов с помощью стандартных сужающих устройств. Часть 2. Диафрагмы. Технические требования– М.: Стандартинформ, 2007.
11. Межгосударственный стандарт ГОСТ 8.586.3-2005. Измерение расхода и количества жидкостей и газов с помощью стандартных сужающих устройств. Часть 3. Сопла и сопла Вентури. Технические требования– М.: Стандартинформ, 2007.
12. Межгосударственный стандарт ГОСТ 8.586.4-2005. Измерение расхода и количества жидкостей и газов с помощью стандартных сужающих устройств. Часть 4. Трубы Вентури. Технические требования– М.: Стандартинформ, 2007.
13. Раннев Г.Г. Методы и средства измерений: Учебник для вузов – М.: Издательский центр «Академия», 2003.

14. Тематический каталог ПГ «Метран», 2007.
15. Тематический каталог фирмы «Krohne», 2006.
16. Технические измерения и приборы. Часть 1. Измерение теплоэнергетических параметров: Учебное пособие для студентов дневной и заочной формы обучения специальности 220301 «Автоматизация технологических процессов и производств»/ Н.В. Чистофорова, А.Г.Колмогоров. – Ангарск, АГТА, 2008. – 200 с.
17. Яковлев В. Структура измерительной системы на базе пассивных датчиков. // Современные технологии автоматизации. №1, 2002.