

## ВВЕДЕНИЕ

Проектирование сложных объектов техники и технологических процессов в настоящее время не может быть успешным без проведения различного рода экспериментов и испытания машин.

Общие понятия и определения. Температурой называют физическую величину, характеризующую степень нагретости тела. Она является не экстенсивной (параметрической), а интенсивной (активной) величиной. Поэтому не представляется возможным создание эталона температуры, подобно тому, как созданы эталоны экстенсивных величин (длина, масса и другие).

Измерить температуру можно только косвенным путем, основываясь на зависимости от температуры таких физических термометрических свойств тел, которые поддаются непосредственному измерению (длина, объем, плотность и т. д.). Средство измерений температуры называют термометром. Для создания термометра необходимо иметь температурную шкалу, т.е. конкретную функциональную числовую связь температуры со значениями измеряемого термометрического свойства.

Температура оказывает влияние на многие процессы, реализуемые в лабораториях и на промышленных предприятиях. В связи с этим измерение температуры приобретает очень большое значение. Обычно измеряемые температуры лежат в интервале от  $-273$  до  $3000$  °С, поэтому для их измерения необходимы разнообразные средства и методы измерения.

Область измерения температуры делится условно на две: термометрию, включающую определение температур до  $500...600$  °С, и пирометрию - для более высоких температур. Соответственно этому применяемые измерительные приборы называются термометрами и пирометрами.

Методы измерения температуры используют различные физические явления в зависимости от изменения температуры. Соответственно этому имеется пять важнейших групп технических измерительных приборов с присущими каждой из них пределами измерения температур:

- термометры расширения, использующие изменение линейных размеров и объема тел, пределы измерения от  $-200$  до  $500$  °С;
- манометрические термометры, использующие изменение давления жидкости, газа или пара в замкнутом объеме, пределы измерения от  $-60$  до  $550$  °С;

- электрические термометры сопротивления, использующие изменения активного сопротивления некоторых проводников и полупроводников, пределы измерения от -200 до 500 °С;

- термоэлектрические пирометры, использующие образование в паре проводников (спае, соединении) термическую электродвижущую силу (ТЭДС), пределы измерений -200 до 1600 °С;

- пирометры излучения, использующие лучеиспускательную способность тел, пределы измерения от 400 до 3000 °С.

Первые четыре перечисленные группы приборов требуют при работе соприкосновения воспринимающего элемента с измеряемой средой, а пирометры излучения являются бесконтактными устройствами.

Благодаря этому пирометры излучения могут быть изолированы от непосредственного действия высоких температур измеряемой среды и не вносят искажений в ее температурное поле.

Оптические способы измерения температуры жидкого металла основаны на использовании зависимости интенсивности излучения тел от их температуры. Яркостная температура измеряется оптическими пирометрами. Эти приборы просты и удобны в обращении и в ряде случаев обеспечивают точность, удовлетворяющую требованиям литейного производства. Недостатками оптических пирометров являются: измерение только яркостной, а не истинной температуры; результаты измерений являются субъективными.

Более совершенным является монохроматический пирометр с исчезающей нитью. В комплект прибора входят: телескоп, показывающий прибор и источник питания. Изображение источников излучения (струи или зеркала жидкой стали) с помощью объектива помещается в плоскости нити пирометрической лампы. Если смотреть в окуляр через красный светофильтр, можно увидеть нить лампы на фоне изображения источника излучения. Изменением положения движка реостата устанавливают необходимый ток, питающий лампу, при котором в пределах контрастной чувствительности человеческого глаза яркость нити будет равна яркости изображения источника излучения. Показания прибора определяют по шкале тока, которая градуируется в градусах яркостной температуры. Такие приборы не могут применяться для автоматической записи температуры и при измерении температуры высоколегированных сталей, содержащих легко окисляемые легирующие элементы (хром, алюминий, титан и др.), так как яркостные температуры окислов и не окисленной стали значительно отличаются.

Поэтому оптические пирометры используют в основном при измерениях температуры углеродистой стали и только в тех цехах, где еще не налажено применение термомпар погружения.

В практике литейного производства наиболее широкое применение находят термоэлектрические пирометры, состоящие из термопары и регистрирующего измерительного прибора (милливольтметра, потенциометра).

Узлы и детали в станке нагреваются различным образом. Различаются как абсолютные значения температур, так и скорость нагрева. Так, резец у токарного станка подвержен быстрому и интенсивному нагреву. Масло в системе смазки станка прогревается медленно и не достигает значительных температур.

Поэтому для изучения температурных полей станка необходимо применять различное оборудование.

Измерители температуры, использующие расширение жидкости или газа, пригодны для измерения медленно изменяющихся температур. Термопары способны измерять широкий диапазон температур и малоинерционны. Также преимуществом термопар являются малые габариты спая. Бесконтактные измерители работают дистанционно и в широком диапазоне температур.

По [1] пирометры и тепловизоры предназначены для бесконтактного измерения температуры объекта. Принцип их работы основан на том, что все нагретые тела излучают инфракрасные волны различной интенсивности в зависимости от температуры, до которой они нагреты.

Различают пирометры полного и частичного излучения. Пирометры полного излучения восприимчивы к радиационному излучению всех длин волн.

Они рассчитывают температуру объекта по показателю суммарной мощности теплового излучения. Яркостные пирометры измеряют температуру нагретого до свечения объекта путем сравнения его цвета с цветом эталонной нагретой нити внутри пирометра. Недостатками пирометров данного типа являются низкая точность, ограниченный диапазон измерения температур и неудобство в применении.

Широкое распространение в настоящее время получили инфракрасные пирометры, принцип работы которых основан на восприятии полупроводниковым чувствительным элементом ИК-излучения от объекта с дальнейшим преобразованием и обработкой сигнала электронной схемой.

Разновидностью инфракрасных пирометров являются цветовые пирометры (мультиспектральные). Они позволяют делать вывод о температуре объекта, сравнивая результаты измерения теплового излучения объекта в различных спектрах, тем самым повышая точность измерения. Достоинством инфракрасных пирометров является их высокая

точность, возможность настройки диапазона измерения и выходного сигнала, а также широкий диапазон измеряемых температур. Современные пирометры могут измерять, в том числе и отрицательные температуры. Значение температуры преобразуется в удобный для восприятия вид.

В тепловизоре кроме IR-сенсора установлена видеокамера. Полученное с камеры изображение выводится на цветной дисплей прибора. Путем наложения изображений с видеокамеры и IR-сенсора на дисплее прибора изображение объекта приобретает соответствующую окраску в зависимости от температуры этой части объекта. На дисплее так же отображается градиентная цветовая шкала, и цифровое значение температуры части объекта, на которую наведен маркер.

## 1. ТЕРМОПАРЫ

Принцип действия термопары основан на эффекте Зеебека, в соответствии с которым в проводнике возникает термоэлектродвижущая сила при наличии разности температуры его концов.

Термопара состоит из двух разнородных проводников с рабочим (горячим) спаем. Рабочий спай погружается в среду, температура которой измеряется. К другим концам термопары (так называемый свободный или холодный спай) присоединяются провода, подключаемые к прибору, измеряющему термоЭДС термопары.

Термопара состоит из двух разнородных проводников-термоэлектродов – положительного и отрицательного, спаянных в одной точке и заключенных в защитный чехол.

Место спая термопары называется ее рабочим концом и помещается в среду, где измеряется температура. К свободным концам термопары присоединяется измерительный прибор – милливольтметр или потенциометр, градуированный в единицах температуры или в милливольтах.

Действие термопары основано на возникновении термоэлектродвижущей силы (термо-э.д.с.) в спае двух разнородных проводников при изменении температуры. Электродвижущая сила термопары зависит от материала термоэлектродов, температуры ее рабочего и свободных концов.

В промышленности применяются следующие типы термопар:

- платино-платинородиевая, гр. ПП (высший предел измерения 1600 °С);
- хромель-алюмелевая, гр. ХА (высший предел измерения 1200 °С);
- хромель-копелевая, гр. ХК (высший предел измерения 800 °С).

Зависимость термо-э.д.с. от температуры для различных термопар при температуре свободных концов 0 °С приведена в табл. 1.1.

Таблица 1.1. – Градуировочные данные различных термопар при температуре свободного конца 0 °С

Температура, °С	Э.д.с. термопар			Температура, °С	Э.д.с. термопар		
	ПП, мВ	ХА, мВ	ХК, мВ		ПП, мВ	ХА, мВ	ХК, мВ
0	0	0	0	350	2,772	14,26	27,15
10	0,057	0,40	0,65	400	3,243	16,39	31,48
15	0,086	0,60	0,98	450	3,722	18,50	35,81
20	0,115	0,80	1,31	500	4,210	20,64	40,15
25	0,145	1,00	2,32	550	4,707	22,77	44,54
30	0,176	1,20	1,98	600	5,212	24,80	49,00
35	0,206	1,41	2,32	650	5,726	27,03	53,39
40	0,237	1,61	2,66	700	6,249	29,14	57,75
45	0,269	1,82	3,00	750	6,780	31,23	62,09
50	0,301	2,02	3,35	800	7,320	33,31	66,40
100	0,64	4,10	6,95	850	7,868	35,35	–
150	1,014	6,13	10,69	900	8,426	37,36	–
200	1,421	8,13	14,65	950	8,992	39,35	–
250	1,86	10,15	18,76	1000	9,566	41,31	–
300	2,310	12,21	22,90				

Конструктивно техническая термопара представляет собой две проволоки разнородных металлов, нагреваемые концы которых скручены и сварены (рис. 3).

Электрическая изоляция обеспечивается применением шелка (не выше 120 °С), лаков (не выше 300 °С) и керамических материалов при более высоких температурах. Изолированные термоэлектроды помещаются в арматуру, обеспечивающую защиту термопары от механических повреждений, химического воздействия среды, высоких температур и давлений. В качестве защитной арматуры для термопар с измеряемой температурой до 1000 ОС применяют нержавеющие стали, а при более высоких температурах используются фарфоровые трубки.

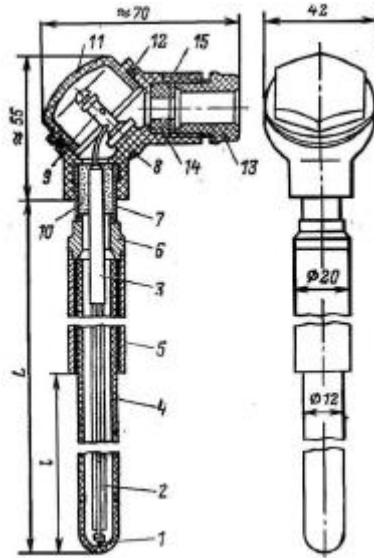


Рис. 3. Термоэлектрический термометр типа ТПП-0555

1 – рабочий конец (спай); 2 и 3 – фарфоровые бусы; 4 – защитный чехол из алунда; 5 – стальная трубка; 6 и 7 – стальные втулки; 8 – защитный корпус; 9 – контактные зажимы; 10 – герметизирующая мастика; 11–15 – элементы герметизации.

Разность термоЭДС термопары может быть измерена вторичным (показывающим или записывающим) прибором по схеме (рис. 4).

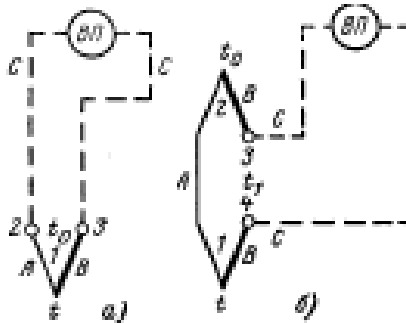


Рис. 4. Присоединение вторичного прибора к термоэлектрическому термометру:  
а – к свободным концам; б – к термоэлектроду

Область спая 1 – область горячего источника температуры, а область 2 – область холодного (фиксированного) источника температуры. Способ соединения проводников А и Б – скрутка, пайка, сварка и т. п. – не имеет существенного значения, если обеспечивается их плотный контакт и размеры контактной зоны не выходят за пределы области 1. При измерении термоЭДС необходимо также фиксировать значение температуры холодного спая (прибора).

Если по схеме (рис. 4) в качестве измерительного прибора используется потенциометр с градуировкой в градусах Цельсия, то он содержит в своей схеме источник компенсации температуры присоединительных клемм.

Если при измерении термоЭДС в качестве измерительного прибора используется потенциометр, измеряющий термоЭДС в милливольтгах, то такой прибор не содержит источника компенсации температуры клемм. Его показания определяются разностью температур в точках 1 и 2 (горячем и холодном спаях термопары). Для удобства пересчета термоЭДС в градусы целесообразно помещать спай области 2 в термостат с тающим льдом (0 °С) или необходимо фиксировать (измерять посредством других способов) температуру холодного спая 2.

При использовании милливольтметра для замера термоЭДС может возникнуть погрешность, обусловленная изменением сопротивления измерительной цепи при колебаниях температуры составляющих ее элементов, поэтому необходимо стремиться к возможно меньшему значению сопротивления проводов и самой термопары.

Значения стандартных термоЭДС, развиваемых термопарой ТХК, представлены в табл. 2, а для термопары ТХА – в табл. 3.

Термопары [1] являются самым распространённым средством измерения температуры в промышленности и лабораториях.

Это связано с их широким температурным диапазоном (от -270 до +2500 °С), обычно удовлетворительной точностью, низкой ценой, взаимозаменяемостью и высокой надёжностью.

Термопара представляет собой два провода из различных металлов, соединённых на одном конце (рабочий конец, горячий спай). Вторые концы термопары (свободные концы, холодный спай) соединены со средством измерения напряжения с помощью проводов из металла одного типа, например меди.

Между двумя несоединёнными выводами термопары возникает эдс, величина которой зависит от температуры горячего спая.

Очень важно обеспечить хороший тепловой контакт между свободными концами термопары и датчиком их температуры. С этой целью для точных измерений используют медную или алюминиевую пласти-

ну, к которой через диэлектрическую прокладку прикрепляются свободные концы термопары и датчик температуры. Конструкция выполняется таким образом, чтобы были обеспечены не только хороший тепловой контакт пластины с датчиком и термопарными проводами, но и изотермичность поверхности.

Для подключения термопары к модулю ввода применяют специальные термопарные провода, выполненные из того же материала, что и сама термопара. В принципе здесь можно использовать и обычные медные провода, однако в этом случае необходим выносной датчик температуры холодного спая, который должен измерять температуру в месте контакта термопары с медными проводами.

Сварка проводов термопары, изготовленных из разных металлов, выполняется таким образом, чтобы получилось небольшое по размеру соединение – спай. Провода можно просто скрутить, однако такое соединение ненадёжно и имеет большой уровень шумов. Сварку металлов иногда заменяют пайкой, но верхняя граница диапазона измерений такой термопары ограничена температурой плавления припоя. Термопары, изготовленные сваркой, выдерживают более высокую температуру, однако химический состав термопары и структура металла в процессе сварки могут нарушаться, что приводит к увеличению разброса градуировочных характеристик.

Под действием высокой температуры в процессе эксплуатации может произойти уход характеристики термопары от номинального вида вследствие окисления и диффузии компонентов окружающей среды в металл, а также изменения структуры материала. В таких случаях термопару следует откалибровать заново или заменить.

Промышленностью выпускаются термопары трёх различных конструкций: с открытым спаем, с изолированным незаземлённым спаем и с заземлённым спаем. Термопары с открытым спаем имеют малую постоянную времени, но плохую коррозионную стойкость. Термопары двух других типов применимы для измерения температуры в агрессивных средах. Изготавливают также микроминиатюрные термопары по тонкоплёночной и полупроводниковой технологиям для измерений температуры малоразмерных тел, в частности, поверхности полупроводниковых компонентов.

При высоких температурах сопротивление материала изоляции термопары уменьшается, и токи утечки через изоляцию могут вносить погрешность в результат измерения. Погрешность возрастает также при попадании жидкости внутрь термопары, вследствие чего возникает гальванический эффект.

Основная проблема построения измерительного канала на базе термопары связана с её малым выходным напряжением (около 50 мкВ на градус), которое гораздо меньше помех, наводимых на элементах измерительной цепи в обычных условиях. Поэтому очень важно правильно выполнить экранирование и заземление проводов, идущих от термопары к модулю ввода. Модуль ввода желательно помещать по возможности ближе к термопаре, чтобы снизить длину проводов, по которым передаётся аналоговый сигнал. Для снижения уровня помех с частотой 50 Гц в модулях ввода используют фильтр.

Примеры пар металлов для термопар даны в таблице 2.

Таблица 2 – Примеры пар металлов для термопар

Материал положительного электрода	Материал отрицательного электрода	Диапазон измерений, °С
Железо, Fe	Константан, Cu-Ni (55 % Cu)	0...900
Хромель, Cr-Ni (90,5 % Ni)	Алюмель, Ni-Al (94,5 % Ni)	-250...40
Медь, Cu	Константан, Cu-Ni (55 % Cu)	-200...40
Хромель, Cr-Ni (90,5 % Ni)	Константан, Cu-Ni (55 % Cu)	-200...40
Нихросил, Ni-Cr-Si-Fe-C-Mg	Нисил, Ni-Cr-Si-Fe-C-Mg	-250...40
Платина-родий (13 % Rh)	Платина, Pt	0...1600
Платина-родий (30 % Rh)	Платина-родий (6 % Rh)	600...1800
Хромель, Cr-Ni (90,5 % Ni)	Копель, Cu-Ni (56 % Cu)	-200...100
Медь, Cu	Копель, Cu-Ni (56 % Cu)	-200...100
Вольфрам-рений, W-Re (5 % Re)	Вольфрам-рений, W-Re (20 % Re)	1000...2500

Важным достоинством термопар является очень низкое внутреннее сопротивление, что делает их практически нечувствительными к ёмкостным наводкам. Точность термопары зависит от химического состава материала.

Внешние факторы, такие как давление, коррозия, радиация, могут изменить кристаллическую структуру или химический состав материала, что приводит к росту погрешности измерений. Погрешность измерений с помощью термопар складывается из следующих составляющих:

- случайная погрешность, вызванная технологическим разбросом характеристик термопары (зависит от чистоты материалов и точности их процентного содержания в материалах электродов);
- случайная погрешность измерения температуры холодного спая;

- погрешность, вызванная постепенной деградацией характеристик при высокой температуре;
- систематическая погрешность компенсации нелинейности (погрешность линеаризации) характеристики преобразования температуры в напряжение;
- систематическая погрешность термического шунтирования, связанная с теплоёмкостью датчика;
- динамическая погрешность;
- погрешность, вызванная внешними помехами;
- погрешность аналого-цифрового канала.

Погрешность измерения температуры холодного спая, погрешность линеаризации, погрешность аналого-цифрового канала и динамическая погрешность относятся к инструментальным погрешностям и указываются в паспорте на модуль ввода. Другие погрешности необходимо учитывать отдельно, в зависимости от типа использованных термопар, электромагнитной обстановки, характеристик объекта измерения и т. п.

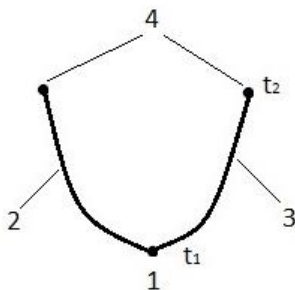


Рис. 5. Схема термопары: 1 – место спая двух проводников; 2, 3 – проводники; 4 – холодный спай

Существует обратный эффект термопары, если подать на концы холодной пары электрический ток место спая будет охлаждаться.

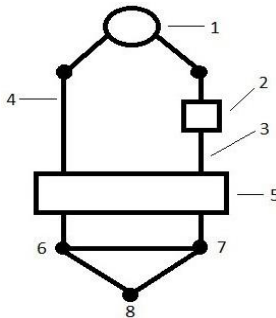


Рис. 6. Схема датчика на основе термопары: 1 – измерительный прибор; 2 – компенсирующее сопротивление; 3, 4 – подводные линии; 5 – место соединения; 6, 7 – сенсор «+» и сенсор «-»; 8 – горячий спай

Термопары делятся по материалу изготовления на:

*из неблагородных металлов:*

- железо контактные, 5000 °С;

- хромель константановые, используются при  $-t$  и высокой чувствительности;

- медь константановые, от  $-t$  до +4000 °С;

- хромель алюминиевые, от -100 до +1000 °С;

- нихлосил нисиловая, от 0 до +12000 °С, но высокая стабильность при 200-5000 С

*из благородных металлов:*

- платинородий платиновая, от +600 до +15000 °С, ниже +4000 °С хар-ка нестабильна;

- платинородий платинородновая, от +600 до +15000 °С, ниже +6000 °С

**Достоинства:**

- большой рабочий температурный диапазон;

- самое большое температурной измерение контактным способом;

- точная фиксация на исследуемом объекте;

- простота и надежность конструкции.

**Недостатки:**

- необходимость контроля температуры холодных спаев для повышения точности температур;

- необходимость контроля герметичности защитных корпусов;

- в процессе работы может произойти изменение характеристика в следствии коррозии или других химических воздействий;

- эффект антенны.

Точность измерения температуры зависит от способа изготовления термопар. Чем больше скорость изменения температуры и меньше размер нагреваемых или охлаждаемых образцов, тем меньше должна быть инерционность спая, и следовательно, меньше его размеры. Горячий спай термопары получают сваркой (лучше электродуговой) двух скрученных проволок, изолированных друг от друга фарфоровыми трубками. Собранный таким образом термопара может быть непосредственно использована для измерений. Если термопара нужна для измерений температуры в химически активной среде, то ее заключают в защитную трубку из жаростойкой стали, кварца или фарфора. Свободные концы термопары выводят непосредственно к измерительному прибору или соединяют с компенсационными проводниками, которые подключают к измерительному прибору.

Компенсационные провода используют для того, чтобы максимально отдалить холодный спай термопары от источника нагрева. Повышение температуры этого спая уменьшает результирующую ТЭДС горячего спая и требует введения значительной и точно не определяемой поправки. Состав компенсационных (удлинительных) проводов выбирают в зависимости от состава основных металлов-электродов табл. 1. Компенсационные провода создают равные, но противоположные по знаку значения ТЭДС, развиваемые в местах их соединения с основными электродами термопары.

Выпускаются термоэлектрические термометры различных исполнений: погружаемые и поверхностные; переносные; разового применения, многократного применения; обыкновенные, водозащитные, взрывобезопасные, защищенные от агрессивных сред и других внешних воздействий; негерметичные и герметичные; малой (МИ), средней (СИ) и большой (БИ) инерционности; обыкновенные и виброустойчивые; одинарные, двойные и тройные - три чувствительных элемента (спая) в одном корпусе (чехле); с открытым спаем, с закрытым (изолированным или неизолированным) спаем; кабельные термометры, которые могут входить как составная часть в другие термопреобразователи, но могут использоваться и самостоятельно.

На рис. 7 а показано устройство стандартного термоэлектрического термометра.

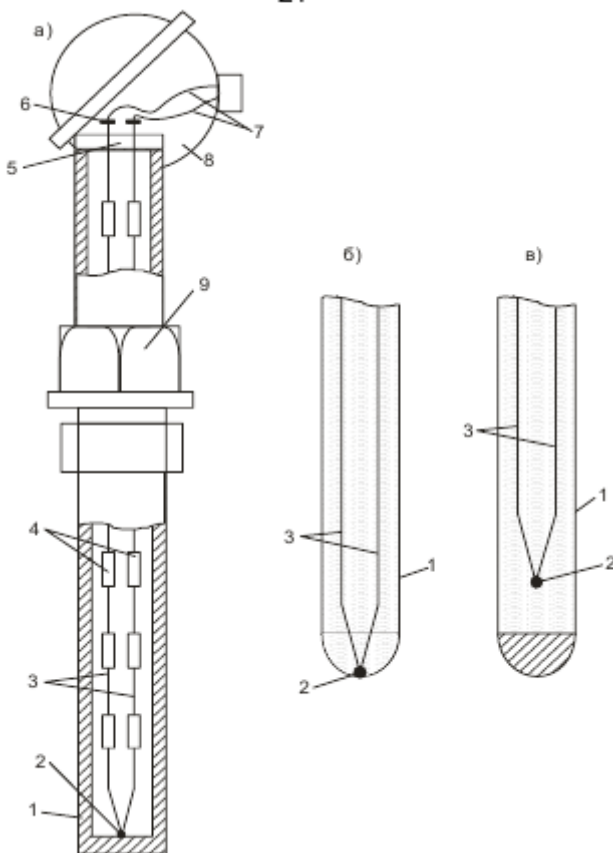


Рис. 7. Конструкция термоэлектрических термометров  
 а), б) с малой инерционностью; в) с большой инерционностью

В жесткой защитной гильзе 1 расположены термоэлектроды 3 с надетыми на них изоляционными бусами 4. Спай 2 касается дна защитной гильзы или может быть изолирован от него с помощью керамического наконечника. К термоэлектродам в головке 8 винтами 6 на розетке 5 подсоединяются удлинительные провода 7. Защитная гильза с содержимым вводится в объект измерения и крепится на нем с помощью штуцера 9. Для обеспечения надежного контакта спай 2 изготавливают сваркой, реже пайкой или скруткой (для высокотемпературных ТЭП). Защитную гильзу 1 выполняют в виде цилиндрической

или конической трубки из газонепроницаемых материалов диаметром примерно 15—25 мм и длиной в зависимости от потребности объекта измерения от 100 до 2500—3500 мм. Материалом для защитной гильзы обычно служат различные стали. Для более высоких температур используются гильзы из тугоплавких соединений, а также кварц и фарфор. Диаметр термоэлектродов составляет 2—3 мм, кроме термоэлектродов платиновой группы, диаметр которых 0,5 мм, что связано с их высокой стоимостью. Стандартные ТЭП выпускают одинарными, двойными и поверхностными — для измерения температуры стенок объекта, когда доступ внутрь объекта затруднителен или невозможен.

В настоящее время широкое применение находят термоэлектрические термометры кабельного типа (Рис. 7., б, в).

В тонкостенной оболочке 1 размещены термоэлектроды 3, изолированные друг от друга, а также от стенки оболочки термостойким керамическим порошком 4. Рабочий спай 2 может иметь контакт с оболочкой (рисунок 2.1, б) или изолируется от нее (рисунок 2.1, в). Оболочку выполняют из высоколегированной нержавеющей стали с наружным диаметром 0,5—6 мм, длиной 10—30 м. Благодаря указанным размерам кабельные термоэлектрические термометры являются весьма гибкими при достаточной механической прочности. Выпускаемые хромель-алюмелевые и хромель-копелевые кабельные термометры можно использовать в интервале температур от —50 до 300°С при давлении 40 МПа. Внутри оболочки кабеля помещены от одного до трех ТЭП.

## 2. ДАТЧИКИ ИЗ БИМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПЛАСТИН

Датчики из биметаллических пластин выполняют из двух материалов с разными температурными коэффициентами расширения. Две пластины сваривают между собой, жестко соединяют, одна пластина имеет очень маленький температурный коэффициент расширения, вторая гораздо больше. При нагреве пластин они будут изгибаться в сторону той пластины, чей температурный коэффициент меньше.

Область применения:

- защитные устройства
- генераторы импульсов
- приборы измерительные
- тепловые двигатели

### 3. ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ И УСТРОЙСТВО ТЕРМОРЕЗИСТОРОВ

Измерение температуры термометрами сопротивления основано на свойстве веществ изменять свое электрическое сопротивление в зависимости от температуры.

Располагая зависимостью сопротивления вещества от температуры и определяя это сопротивление при помощи электроизмерительного прибора, можно судить о температуре этого вещества.

В качестве вторичных приборов, работающих с термометрами сопротивления, применяются уравновешенные измерительные мосты и логометры.

У большинства металлов нагрев увеличивает электрическое сопротивление. Материалами, из которых изготавливаются металлические сопротивления, служат платина и медь. Платина имеет нелинейную зависимость сопротивления от температуры, а медь – линейную. Основные технические данные некоторых выпускаемых термометров сопротивления приведены в табл. 3.

Таблица 3 – Технические данные металлических термометров сопротивления

Тип термометра	Характеристика	Пределы измерения, °С	Инерционность, мин
ТСП-I ТСП-III	Платиновый, одинарный, градуировка гр. 21 ( $R_0 = 46 \text{ Ом}$ )	0...500	до 4
ТСМ-X ТСМ-XIV	Медный, одинарный, градуировка гр. 23 ( $R_0 = 53 \text{ Ом}$ )	- 50...100	до 4

В зависимости от величины электрического сопротивления  $R_0$  при  $t = 0 \text{ C}$  термометры сопротивления делятся на градуировочные группы: платиновые - гр. 21 ( $R_0 = 46 \text{ Ом}$ ), гр.22 ( $R_0 = 100 \text{ Ом}$ ), гр. 20 ( $R_0 = 10 \text{ Ом}$ );

медные – гр. 23 ( $R_0 = 53 \text{ Ом}$ ); гр. 24 ( $R_0 = 100 \text{ Ом}$ ). Градуировочные характеристики их строятся в соответствии с ГОСТ 6651-59.

Платиновые термометры сопротивления выполняются из платиновой проволоки диаметром 0,07 мм, бифилярно намотанной на слюдяную пластинку с зубчатыми краями. В прорезях пластинки укреплены концы серебряных выводов, к которым припаяны концы проволоки элемента сопротивления. Платиновая проволока, намотанная на слюдяную пластинку, изолирована с двух сторон слюдяными накладками, скрепленными обмоткой из серебряной ленты. Элемент сопротивления помещен в защитную трубку из нержавеющей стали. Алюминиевые

вкладыши заполняют сечение трубки с обеих сторон изолированного чувствительного элемента. Выводы проводов изолированы фарфором. Арматура термометра состоит из трубы с заваренным дном, гайки и головки. Минимальная глубина погружения – 150 мм.

Для уменьшения инерционности выпускают лепестковые термометры. В них вместо вкладышей используются лепестки из дюраля толщиной 0,07...0,1 мм, создающие хороший тепловой контакт между чувствительным элементом и арматурой.

Медные термометры сопротивления имеют обмотку чувствительного элемента из медной эмалированной проволоки диаметром 0,1 мм. Чувствительный элемент заключен в защитную латунную трубку с обжатым концом.

Данный вид датчика относится к пассивному типу.

Принцип работы: изменяется активное сопротивление чувствительного элемента под воздействием температуры. Для данных датчиков функциональная зависимость изменения сопротивления от  $t$  близка к линейной.

При формировании полупроводникового резистора определяющим фактором является экспоненциальная температурная зависимость концентрации носителей заряда и электропроводности проводника.

Температурный коэффициент сопротивления (ТКС)  $\alpha$  любого полупроводникового материала представляет собой отношение скорости изменения сопротивления  $R$  с температурой  $dR/dT$  к сопротивлению при заданной температуре.

Важнейшей характеристикой терморезистора является его статическая вольт-амперная характеристика, имеющая ярко выраженный нелинейный характер (см. рис. 8).

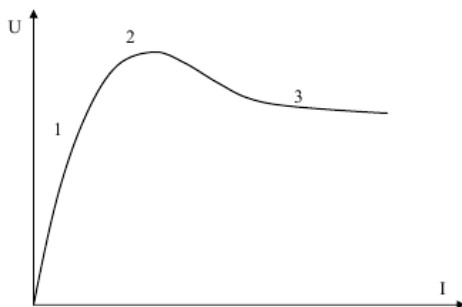


Рис. 8. Статическая вольт-амперная характеристика терморезистора с отрицательным температурным коэффициентом сопротивления

Для указанной зависимости характерны три основных участка. На начальном участке (1) при малых токах  $I$  через терморезистор ВАХ линейная, поэтому выполняется закон Ома.

С увеличением тока, т. е. с возрастанием мощности, выделяемой терморезистором, температура последнего возрастает. В свою очередь, повышение температуры полупроводника вызывает рост электропроводности, в основном за счет резкого увеличения числа свободных носителей заряда, поэтому на участке (2) линейность ВАХ нарушается.

Дальнейшее возрастание рассеиваемой мощности терморезистора приводит к такому значительному уменьшению сопротивления  $R$  (росту  $\sigma$ ), что с ростом тока напряжение на терморезисторе падает и на ВАХ появляется участок 3 с отрицательным дифференциальным сопротивлением.

### **Применение терморезисторов с отрицательным ТКС**

Наиболее важными областями применения терморезисторов с отрицательным ТКС являются измерение и регулирование температуры, сигнализация об изменении предельных значений температуры, а также компенсация изменений сопротивления в электрических цепях, вызванных колебаниями температуры окружающей среды. Все эти применения основаны на зависимости сопротивления терморезистора от температуры. Терморезисторы обладают рядом преимуществ перед другими термодатчиками:

- большим ТКС
- широким диапазоном значений сопротивления
- способностью работать в достаточно широком интервале температур в твёрдых, жидких и газообразных средах
- широким выбором форм и размеров, обеспечивающим удобство монтажа в различных механических конструкциях
- способностью выдерживать электрические и механические перегрузки.

Недостатком терморезисторов с отрицательным ТКС является нелинейность температурной характеристики сопротивления, которая сильно затрудняет измерение и компенсацию температуры.

Существуют различные методы преобразования нормальной температурной характеристики терморезистора с отрицательным ТКС в другую, которая даёт линейную зависимость выходного сигнала от температуры. Однако такое преобразование, если оно осуществляется с помощью только постоянных резисторов, может сопровождаться некоторой потерей чувствительности.

В ряде случаев, например при температурной компенсации металлов или схемных элементов, высокий отрицательный ТКС терморезистора нужно уменьшить, чтобы согласовать его с ТКС компенсационного материала. При этом одновременно происходит линейаризация характеристики терморезистора.

### **Терморезисторы с положительным ТКС из простых полупроводников**

У всех полупроводниковых материалов, предназначенных для изготовления терморезисторов, удельное сопротивление должно обязательно зависеть от температуры. Для подавляющего большинства терморезисторов разработаны специальные композиты, которые увеличивают их чувствительность и максимальный отклик на изменение температуры. В некоторых ситуациях, например при термокомпенсации электронных схем, температурная чувствительность этих композиций оказывается слишком высокой и ее приходится снижать во избежание чрезмерной коррекции. Следовательно, здесь нужны материалы с меньшей чувствительностью к изменению температуры. Этому требованию идеально отвечают такие простые полупроводники, как кремний и германий.

Типовая зависимость удельного сопротивления монокристаллического кремния и германия от температуры приведена на рис. 1.13. Эту кривую можно разделить на три области, две из которых имеют большой отрицательный ТКС, а третья, средняя, – небольшой положительный ТКС.



Рис.9. Температурная характеристика удельных сопротивлений германия и кремния в широком интервале температур

Обе области с отрицательным ТКС обусловлены собственной и примесной проводимостью полупроводникового материала.

В промежутке обедненной области с положительным ТКС изменение удельного сопротивления зависит от изменения подвижности носителей заряда с температурой при постоянстве числа этих носителей. В германии переход от области с положительным ТКС к области собственной проводимости с отрицательным ТКС происходит в диапазоне температур  $0-80^{\circ}\text{C}$ , так что полезный интервал с положительным ТКС оказывается слишком узким для большинства применений терморезисторов. Однако в кремнии область с положительным ТКС простирается от  $-60$  до  $+150^{\circ}\text{C}$  и совпадает с рабочим интервалом резисторов с низким ТКС.

Низкотемпературная примесная область с отрицательным ТКС в германии пригодна для криогенных применений. Сейчас изготавливают германиевые термометры, работающие при криогенных температурах.

Схема датчика выполненного в виде металлической трубки.

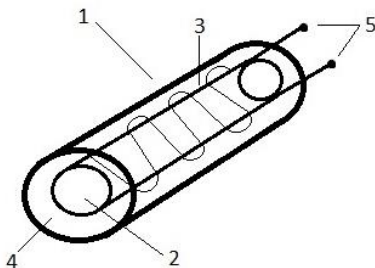


Рис. 10. Схема трубчатого терморезистора: 1 – корпус; 2 – полый металлический цилиндр; 3 – чувствительный элемент в виде спирали из проволоки; 4 – защитная эмаль; 5 – провода для сбора информации

Полая металлическая трубка покрывается оксидом, для изоляции витков друг от друга, а также для повышения вибропрочности спирали. За счет металлической трубки увеличивается коэффициент расширения датчика, т. к. температурный коэффициент расширения в проволоке гораздо больше чем температурный коэффициент.



Рис. 11. Схема датчика выполненного в виде пленки: 1 – керамическая подложка; 2 – чувствительный элемент; 3 – место сбора информации

Подложка выполнена из керамики, которая выдерживает большие температуры, на нее наносится чувствительный элемент в виде пленки, затем все покрывается изоляционным слоем. В отличие от проволочных, у пленочных хуже характеристики, зависимость уходит от линейной. Стабильность работы также хуже, чем у проволочных но пленочные дешевле и быстрее реагируют на изменение температуры.

**Достоинства:**

- высокая точность измерения
- широкий температурный диапазон
- возможность использования в ответственных приборах
- простота и надежность конструкции

**Недостатки:**

- высокая стоимость
- работает только в заданных диапазонах
- сложность изготовления

Конструкция технических термометров с металлическим термопреобразователем сопротивления приведена на рис. 12.

Тонкая проволока или лента 1 из платины или меди наматывается на каркас 2 из керамики, слюды, кварца, стекла или пластмассы. Бифилярная намотка необходима для исключения индуктивного сопротивления. После намотки проволоки каркас покрывают слюдой. Длина намотки с платиновой проволокой 50-100мм, а с медной – 40мм. Каркас для защиты от повреждений помещают в тонкостенную алюминиевую гильзу 3, а для улучшения теплопередачи от измеряемой среды к намотанной части каркаса между последней и защитной гильзой 3 устанавливают упругие металлические пластины 4 или массивный металлический вкладыш. Гильзу 3 с ее содержимым помещают во внешний, обычно стальной, замкнутый чехол 5, который устанавливается на объекте измерения с помощью штуцера 6. На внешней стороне чех-

ла располагается соединительная головка 8, в которой находится изоляционная колодка 7 с винтами для крепления выводных проводов, идущих от каркаса через изоляционные бусы 9.

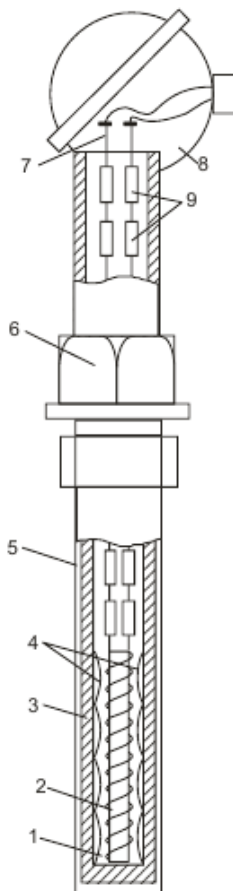


Рис. 12. Конструкция термометра с металлическим термопреобразователем сопротивления

Выпускаются следующие градуировки медных термометров сопротивления 10М; 50М; 100М. В таблице 2.5 и 2.6 приведены основные показатели, позволяющие оценивать допустимые отклонения характеристик термометров от номинальных значений.

В последнее время широкое распространение за рубежом получили пленочные термосопротивления на основе полупроводниковых материалов.

Они имеют очень малые размеры (толщина пленки полупроводника составляет 10-6м), большое номинальное сопротивление (до 1 кОм) и соответствуют стандарту МЭК. Причем являются самыми дешевыми и самыми продаваемыми сенсорами. Диапазон измерения пленочных термосопротивлений составляет от  $-50^{\circ}\text{C}$  до  $600^{\circ}\text{C}$ . Классы допуска у них такие же как и у платиновых термосопротивлений.

Микропроцессорный преобразователь состоит из первичного преобразователя, помещенного в защитную арматуру (термозонд) и микропроцессорного преобразователя, встроенного в головку (рис. 13).

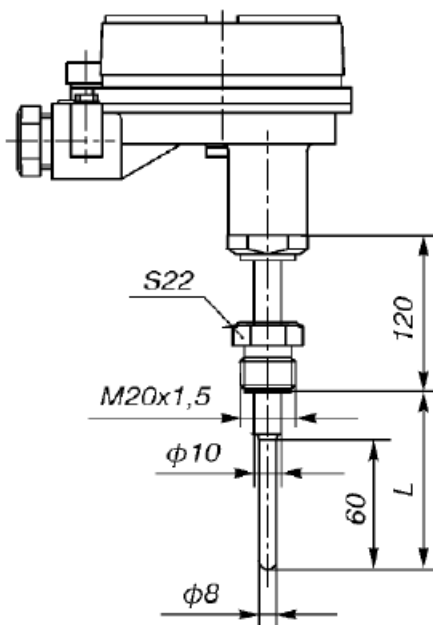


Рис. 13. Конструкция микропроцессорного преобразователя

Микропроцессорный преобразователь позволяет осуществлять:

- перенастройку диапазона преобразуемых температур;
- детектирование обрыва или короткого замыкания первичного преобразователя температуры;

- самодиагностику;
- линеаризацию номинальной статической характеристики чувствительного элемента;
- перенастройку номинальной статической характеристики в случае замены чувствительного элемента на другой тип;
- калибровку датчика под индивидуальную статическую характеристику чувствительного элемента по 2...8 температурным точкам для повышения его точности;
- выбор времени демпфирования измеряемого сигнала;
- автоматическую компенсацию изменения температуры холодных спаев термоэлектрического преобразователя.

#### 4. ПИРОМЕТРЫ

Пирометры – это датчики, которые контролируют температуру бесконтактным способом. Данный вид датчика относится к пассивному типу.

Принцип действия основан на улавливании и измерении  $t$  по тепловому электромагнитному излучению, т.е. они измеряют значение амплитуды электромагнитного излучения от объекта в инфокрасной части спектра, а затем преобразуют измеренное значение в температуру.

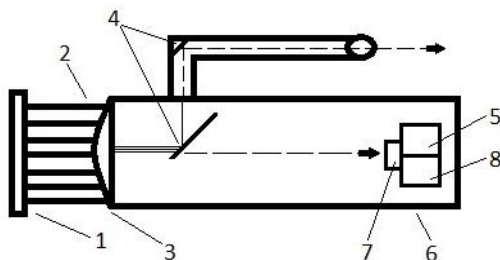


Рис. 14. Схема пирометра: 1 – объект измерения; 2 – тепловое излучение; 3 – оптическая линза; 4 – зеркало; 5 – измерительное расчетное устройство; 6 – корпус; 7 – датчик; 8 – электронный преобразователь

Тепловой луч сфокусированный оптической системой попадает на датчик (первичный пирометрический преобразователь). В результате на выходе образуется электрический сигнал пропорциональный значению температуры объекта измерения.

Этот сигнал проходит через электронный преобразователь (вторичный пирометрический преобразователь) и попадет в измерительное

счетное устройство. Результат отображается на дисплее, цифровое значение температуры измерения можно производить с любого расстояния в зависимости от прозрачности атмосферы и площади измеряемого пятна.

Оптическое разрешение – это отношение диаметры светового пятна к расстоянию до объекта измерения, т.е. диаметр пятна определяется оптическим разрешением и зависит от расстояния между пирометром и объектом измерения.

$$S = K D$$

$K$  – показатель визирования

$D$  – расстояние до объекта

Чем больше оптическое разрешение, тем более мелкие предметы можно измерить.

#### **Область применения:**

- измерение температуры в опасных для человеческого организма условиях

- измерение температуры труднодоступных объектов

- сканирование для описания холодных и горячих точек

- диагностирование электро- и тепло-объектов

- определение температуры объектов которые находятся в движении

- контроль системы вентиляции

По принципу работы пирометры разделяются на виды:

**Яркостные** – они работают по принципу сравнения цвета объекта с цветом эталонной нити

**Цветовые** – они сравнивают тепловое излучение в определенных спектрах в излучения поступающие от объектов.

**Радиационные** – они сравнивают мощность излучения

**Проэлектрические** – они контролируют инфракрасные излучения.

*Яркостные* работают в диапазоне ультрафиолетового излучения и видимого света. Диапазон  $t$  до 3000 °С. При использовании различных фильтров диапазон измерений увеличивается до 6000 °С.

*Цветовые* работают в диапазоне от 1000 °С до 2500 °С. Принцип работы: излучение которое поступает от объекта проходит через вращательный диск с определенными цветовыми фильтрами которые пропускают только определенный спектр цветов, который в свою очередь поступает на фотоэлемент и через преобразователь преобразуется в электрический сигнал.

*Радиационные* – диапазон от  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $2500\text{ }^{\circ}\text{C}$ . В качестве чувствительных элементов служит батареи из миниатюрных термопар. Данный пирометр работает в ультрафиолете, видимом свете и инфракрасном излучении. Принцип работы: фокусирующее устройство направляет излучение на термопары, переводит в ЭДС которое показывается на дисплее.

*Пирозлектрические* – работают только в инфокрасном излучении. Принцип действия: существуют определенные кристаллы, которые воспринимают только инфокрасное излучение и переводят его в электрический сигнал.

**Достоинства:**

- большой температурный диапазон работы
- измерение бесконтактным способом
- возможность измерения температуры объектов находящихся в движении

**Недостатки:**

- точность измерения зависит от состояния поверхности измеряемого объекта(наличие оксидной пленки, краски, пыли, все то что поглощает излучение)
- контролируют температуру только поверхности
- зависимость показаний от прозрачности окружающей среды

Все виды пирометров реализуют бесконтактный оптический метод измерения температуры, основанный на законах теплового излучения тел.

Применение этого метода не требует введения датчика в контролируемую среду, что имеет решающее значение при измерении температуры агрессивных сред и сред со значениями температур выше  $1600\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Пирометрические датчики характеризуются также малой тепловой инерционностью. В основе этого бесконтактного метода измерения лежит зависимость интенсивности излучения абсолютно черного тела от его температуры.

Тепловое излучение любого тела можно характеризовать спектральной плотностью  $\rho_{\lambda, T}$ , то есть количеством энергии, излучаемым в единицу времени с единицы площади поверхности тела и приходящимся на единицу диапазона длин волн.

На рис. 15 приведены кривые спектральной светимости абсолютно черного тела.

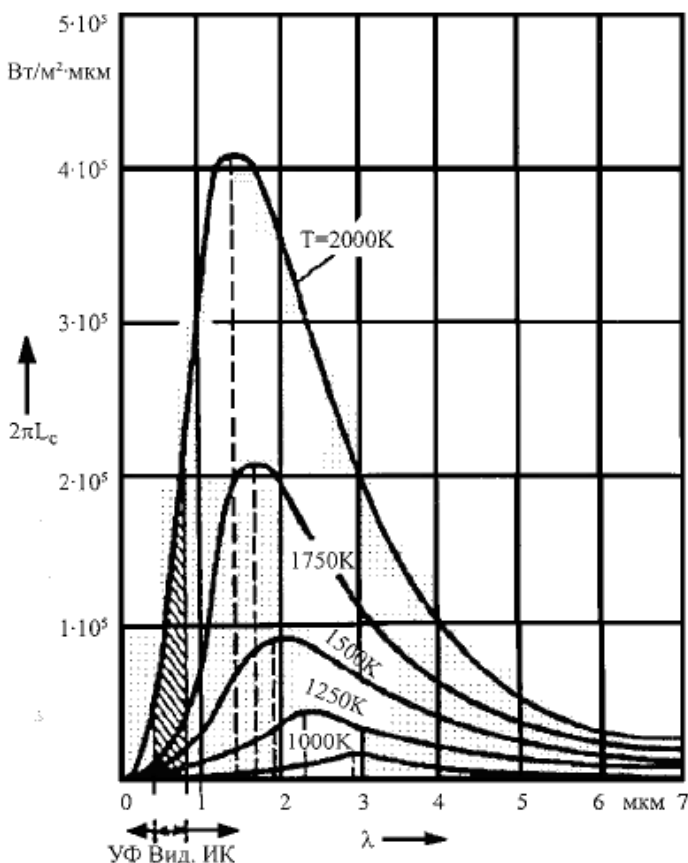


Рис. 15. Изменение плотностей потоков излучения при различных значениях длин волны и температуры: УФ – ультрафиолетовые; Вид. – видимые; ИК – инфракрасные

В зависимости от вида входной величины датчика существуют оптические пирометры:

- радиационные, воспринимающие полную энергию излучения, соответствующую всей площади под кривыми;
- яркостные, воспринимающие энергию излучения в какой-либо узкой области спектра;
- цветковые, основанные на измерении отношения интенсивности излучения в двух различных точках кривой.

Инфракрасные термометры, или пирометры, предназначены для измерения температуры бесконтактным способом. В основу работы таких термометров положен принцип преобразования потока инфракрасного излучения от объекта, принимаемого чувствительным элементом, в электрический сигнал, пропорциональный спектральной плотности мощности потока излучения. Внешний вид пирометра показан на рис. 16.



Рис. 16. Ручной инфракрасный пирометр (внешний вид)

Пирометр смонтирован в корпусе с пистолетной рукояткой. В передней части расположен объектив пирометра (приёмное окно), который наводится на объект измерения. Измерительная схема включается курком, который необходимо удерживать, не сбивая наводку до тех пор, пока на дисплее в задней части прибора не появятся результаты измерения.

Для облегчения наводки на объект в корпусе помещён лазерный целеуказатель, включаемый кнопкой в задней части корпуса. Лазер служит только для наводки и в измерениях не участвует.

Внимание! Категорически запрещается направлять пирометр на людей! Излучение лазера может повредить глаза.

## **5. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА**

1. Изложить принцип работы термопар, начертить схемы изменения температуры и привести их характеристики.
2. Привести достоинства и недостатки термопар.
3. Изложить принцип работы терморезисторов, начертить схемы изменения температуры и привести их характеристики.
4. Привести достоинства и недостатки терморезисторов.
1. Изложить принцип работы пирометров, начертить схемы изменения температуры и привести их характеристики.
2. Привести достоинства и недостатки пирометров.

## **КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ**

1. Назовите методы измерения температуры.
2. Изложите принцип работы термопар.
3. Что такое температурная компенсация?
4. Назовите материалы для термопар.
5. Приведите достоинства термопар.
6. Приведите недостатки термопар.
7. Изложите принцип работы терморезисторов.
8. Приведите достоинства терморезисторов.
9. Приведите недостатки терморезисторов.
10. Изложите принцип работы пирометров.
11. Приведите достоинства пирометров.
12. Приведите недостатки пирометров.
13. Как устроен и работает емкостной преобразователь для измерения влажности веществ?

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Сошинов, А. Г. Преобразователи неэлектрических величин : учеб. пособие / А. Г. Сошинов. – Волгоград : ВолгГТУ, 2002. – 36 с.
2. Левшина, Е. С. Электрические измерения физических величин (Измерительные преобразователи) : учеб. пособие / Е. С. Левшина, П. В. Новицкий. – Ленинград : Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1983. – 320 с.
3. Котюк, А. Ф. Датчики в современных измерениях / А. Ф. Котюк. – Москва : Радио и связь, Горячая линия – Телеком, 2006. – 96 с.
4. Мейзда, Ф. Электронные измерительные приборы и методы измерений / Ф. Мейзда ; пер. с англ. – Москва : Мир, 1990. – 535 с.
5. Современные датчики. Справочник / под общ. ред. В. М. Шарапова, Е. С. Полищука. – Москва : Техносфера, 2012. – 624 с.
6. Олейник, Б. Приборы и методы температурных измерений. – М. : Издательство стандартов, 1987. – 293 с.