Введение

Современная термодинамика определяет температуру как величину, выражающую состояние внутреннего движения равновесной макроскопической системы и определяемую внутренней энергией и внешними параметрами системы.  
Непосредственно температуру измерить невозможно, можно лишь судить о ней по изменению внешних параметров, вызванному нарушением состояния равновесия благодаря теплообмену с другими телами.

Каждому методу определения температуры, в основе которого лежит зависимость между каким-либо внешним параметром системы и температурой, соответствует определенная последовательность значений параметра для каждого размера температуры, называемая температурной шкалой. Наиболее совершенной шкалой является термодинамическая температурная шкала (шкала  
Кельвина). Практическая ее реализация осуществляется с помощью  
Международной практической температурной шкалы (МПТШ), устанавливающей определенное число фиксированных воспроизводимых реперных точек, соответствующих температуре фазового равновесия различных предельно чистых веществ.

Исходным эталоном температуры является комплекс изготовленных в разных странах мира газовых термометров, по показаниям которых определяются численные значения реперных точек по отношению к точке кипения химически чистой воды при давлении 101325 Па, температура которой принята равной  
100,00°С(373,15 К точно). Для практического воспроизведения и хранения МПТШ международным соглашением установлены единые числовые значения реперных точек, которые с развитием техники время от времени уточняются и корректируются. Последняя корректировка была произведена в 1968 г. Согласно  
МПТШ—68 установлены следующие реперные точки, соответствующиедавлению 101325 Па: точка кипения кислорода —182,97 °С (90,18 К), тройная точка воды  
(при давлении 610 Па) +0,01 °С (273,16 К), точка кипения воды +100,00 °С  
(373,15 К), точки затвердевания: олова +231,9681 °С (505,1181К),цинка  
+419,58 °С (692,73 К), серебра +961,93 °С (1235,08 К) изолота+1064,43°С(1337,58 К).

Весь температурный диапазон перекрывается семью шкалами, для воспроизведения которых в зависимости от области шкалы используются различные методы: от 1,5 до 4 К — измерение давления паров гелия-4, от 4,2 до 13,8 К — германиевые терморезисторы, от 13,8 до 273,16 К и от 273,16 до  
903,89 К— платиновые терморезисторы от 903,89 до 1337,58 К — термопары платинородий — платина, от 1337,58 до 2800 К — температурные лампы и от  
2800 до 100 000 К — спектральные методы.

Огромный диапазон существующих температур (теоретически максимально возможное значение температуры составляет 1012 К) обусловил большое разнообразие методов их измерения. Наиболее распространенные методы измерения температуры и области их применения приведены в таблице 1.

Термоэлектрический метод измерения температуры основан на использовании зависимости термоэлектродвижущей силы от температуры

Нас будут интересовать контактные методы и средства электроизмерения температур.

1. Общие сведения о термоэлектрических преобразователях

1.1. ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ.

ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ, ПРИМЕНЯЕМЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Тепловым называется преобразователь, принцип действия которого основан на тепловых процессах и естественной входной величиной которого является температура. К таким преобразователям относятся термопары и терморезисторы, металлические и полупроводниковые. Основным уравнением теплового преобразования является уравнение теплового баланса, физический смысл которого заключается в том, что все тепло, поступающее к преобразователю, идет на повышение его теплосодержания QТС и, следовательно, если теплосодержание преобразователя остается неизменным (не меняется температура и агрегатное состояние), то количество поступающего в единицу времени тепла равно количеству отдаваемого тепла. Тепло, поступающее к преобразователю, является суммой количества тепла Qэл, создаваемого в результате выделения в нем электрической мощности, и количества тепла Qто, поступающего в преобразователь или отдаваемого им в результате теплообмена с окружающей средой.

Явление термоэлектричества было открыто в 1823 г. Зеебеком и заключается в следующем. Если составить цепь из двух различных проводников(или полупроводников) А и В, соединив их между собой концами (рис. 1а), причем температуру 1 одного места соединения сделать отличной от температуры о другого, то в цепи появится э.д.с., называемая термоэлектродвижущей силой (термо-э.д.с.) и представляющая собой разность функций температур, мест соединения проводников.

Подобная цепь называется термоэлектрическим преобразова . телем или иначе термопарой; проводники, составляющие термопару, — термоэлектродами, а места их соединения — спаями.

При небольшом перепаде температур между спаями термо-э. д. с. можно считать пропорциональной разности температур.

Опыт показывает, что у любой пары однородных проводников подчиняющихся закону Ома, величина термо-э.д.с. зависит только от природы проводников и от температуры спаев и не зависит от распределения температур между спаями.

Явление термоэлектричества принадлежит к числу обратимых явлений, обратный эффект был открыт в 1834 г. Жаном Пельтье и назван его именем.  
Если через цепь, состоящую из двух различных проводников или полупроводников, пропустить электрический ток, то тепло выделяется в одном спае и поглощается в другом. Теплота Пельтье связана с силой тока линейной зависимостью в отличие от теплоты Джоуля, и в зависимости от направления тока происходит нагревание или охлаждение спая.

Поглощаемая или выделяемая тепловая мощность пропорциональна силе тока, зависит от природы материалов, образующих спай, характеризуется коэффициентом Пельтье.

Во второй половине XIX в. Томсоном был открыт эффект, заключающийся в установлении на концах однородного проводника, имеющего температурный градиент, некоторой разности потенциалов и в выделении дополнительной тепловой мощности при прохождении тока по проводнику, имеющему температурный градиент. Однако э.д.с. Томсона и дополнительное тепло настолько малы, что в практических расчетах ими обычно пренебрегают.

На рис. 1б показана принципиальная схема термоэлектрического преобразователя, который в зависимости от положения переключателя Кл может работать в режиме генератора электрической энергии (положение 1) и в режиме переноса тепла от источника с температурой к резервуару с температурой.

К.п.д. термоэлектрического генератора зависит от разности температур и свойств материалов и для существующих материалов очень мал (при = 300° не превышае = 13%, а при= 100° значение= 5%), поэтому термоэлектрические генераторы используются как генераторы энергии лишь в специальных условиях. К.п.д. термоэлектрического подогревателя и холодильника также очень малы, и для охлаждения к.п.д. при температурном перепаде 5° составляет 9%, а при перепаде 40° — только 0,6%; однако, несмотря на столь низкие к.п.д., термоэлементы используются в холодильных устройствах. В измерительной технике термопары получили широкое распространение для измерения температур; кроме того, полупроводниковые термоэлементы используются как обратные тепловые преобразователи, преобразующие электрический ток в тепловой поток и температуру.

Термопара с подключенным к ней милливольтметром, применяемая для измерения температуры.

Если один спай термопары, называемый рабочим, поместить в среду с температурой 1, подлежащей измерению, а температуру 2, других, нерабочих, спаев поддерживать постоянной, то f(0) = const и

EAB(1) = f(1) – C= f1(1). независимо от того, каким образом произведено соединение термоэлектродов(спайкой, сваркой и т. д.). Таким образом, естественной входной величиной термопары является температура ее рабочего спая, а выходной величиной — термо-э. д. с., которую термопара развивает при строго постоянной температуре 2 нерабочего спая.  
Материалы, применяемые для термопар. В табл. 2 приведены термо-э.д.с., которые развиваются различными термоэлектродами в паре с платиной при температуре рабочего спая 1 = 100° С и температуре нерабочих спаев  
2 = 0° С. Зависимость термо-э.д.с. от температуры в широком диапазоне температур обычно нелинейна, поэтому данные таблицы нельзя распространить на более высокие температуры.

Таблица 1

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Материал | Термо-эдс мВ | Материал | Термо-эдс мВ |
| Кремний | +44 | Свинец | +0,44 |
| Сурьма | +4,7 | Олово | +0,42 |
| Хромель | +2,4 | Магний | +0,42 |
| Нихром | +2,2 | Алюминий | +0,40 |
| Железо | +1,8 | Графит | +0,32 |
| Сплав | +1,3 | Уголь | +0,30 |
| Молибден | +1,2 | Ртуть | +0 |
| Кадмий | +0,9 | Палладий | -0,57 |
| Вольфрам | +0,8 | Никель | -1,5 |
| Манганин | +0,76 | Алюмель | -1,7 |
| Медь | +0,76 | Сплав | -2,31 |
| Золото | +0,75 | Константан | -3,4 |
| Цинк | +0,75 | Копель | -4,5 |
| Серебро | +0,72 | Пирит | -12,1 |
| Иридий | +0,65 | Молибден | -69 |
| Родий | +0,64 | Сплав | +0,64 |
|  |  |  |  |
|  |  |  |  |
|  |  |  |  |

При пользовании данными таблицы следует иметь в виду, что развиваемые термоэлектродами термо-э.д.с. в значительной степени зависят от малейших примесей, механической обработки (наклеп) и термической обработки (закалка, отжиг).

При конструировании термопар, естественно, стремятся сочетать термоэлектроды, один из которых развивает с платиной положительную, а другой — отрицательную термо-э.д.с. При этом необходимо учитывать также пригодность того или иного термоэлектрода для применения в заданных условиях измерения (влияние на термоэлектрод среды, температуры и т. д.).

Для повышения выходной э.д.с. используется несколько термопар, образующих термобатарею. Рабочие спаи термопар расположены на черненом лепестке, поглощающем излучение, холодные концы — на массивном медном кольце, служащем теплоотводом и прикрытом экраном. Благодаря массивности и хорошей теплоотдаче кольца температуру свободных концов можно считать постоянной и равной комнатной.

1.2. УДЛИНИТЕЛЬНЫЕ ТЕРМОЭЛЕКТРОДЫ, ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ЦЕПИ, ПОГРЕШНОСТИ ТЕРМОПАР

Удлинительные термоэлектроды. Свободные концы термопары лолжны находиться при постоянной температуре, лучше всего при 0°С. Однако не всегда возможно сделать термоэлектроды термопары настолько длинными и гибкими, чтобы свободные концы ее можно было разместить в достаточном удалении от рабочего спая. Кроме того, при использовании благородных металлов делать длинные термоэлектроды экономически невыгодно, поэтому приходится использовать провода от другого материала.  
Соединительные провода A1 и B1 ,идущие от зажимов в головке термопары до места нахождения нерабочих спаев и выполняемые из дешевых материалов, называют удлинительными термоэлектродами. Чтобы при включении удлинительных термоэлектродов из материалов, отличных от материалов основных термоэлектродов, не изменилась термо-э.д.с. термопары, необходимо выполнить два условия. Первое — удлинительные термоэлектроды должны быть термоэлектрически идентичны с основной термопарой, т. е. иметь ту же термо- э.д.с. в диапазоне возможных температур.

Места соединения термоэлектродов в головке термопары (примерно в диапазоне от 0 до 100° С). И второе—места присоединения удлинительных термоэлектродов к основным термоэлектродам в головке термопары должны иметь одинаковую температуру,

Для термопары платинородий — платина применяются удлинительные термоэлектроды из меди и сплава ТП, образующие термопару, термоидентичную термопаре платинородий — платина в пределах до 150° С. Такие же удлинительные термоэлектроды с измененными знаками полярности применяют для термопары вольфрам — молибден. Для термопары хромель — алюмель удлинительные термоэлектроды изготовляются из меди и константана. Для термопары хромель — копель удлинительными являются основные термоэлектроды, но выполненные в виде гибких проводов.

Погрешность, обусловленная изменением температуры нерабо-ihx спаев термопары. Градуировка термопар осуществляется при температуре нерабочих спаев, равной нулю. Если при практическом использовании термоэлектрического пирометра температура нерабочих спаев будет отличаться от 0° С на величину  
0 , то необходимо ввести соответствующую поправку в показания термометра.

Однако следует иметь в виду, что из-за нелинейной зависимости между э.д.с. термопары и температурой рабочего спая величина поправки к показаниям указателя,градуированного непосредственно в градусах, не будет равна разности температур 0 свободных концов.

Величина поправки связана с разностью температур свободных концов через коэффициент k называемый поправочным коэффициентом на температуру нерабочих концов. Величина k различна для каждого участка кривой, поэтому градуировочную кривую разделяют на участки по 100° С и для каждого участка определяют значение k.

В цепь термопары и милливольтметра включен мост, одним из плеч которого является терморезистор RТ из медной или никелевой проволоки, помещенный возле нерабочих спаев термопары (остальные плечи моста выполнены из манганиновых резисторов). При температуре мост находится в равновесии и напряжение на его выходной диагонали равно нулю. При повышении температуры нерабочих спаев сопротивление RТ также увеличивается, мост выходит из равновесия и возникающее напряжение на выходной диагонали моста корректирует уменьшение термо-э.д.с. термопары. Вследствие нелинейности термопар полной коррекции погрешности, обусловленной изменением температуры нерабочих спаев, при помощи описываемого устройства получить не удается, однако величина остаточной погрешности не превышает 0,04 мВ на 10 К.

Недостатком подобных устройств является необходимость в источнике тока для питания моста и появление дополнительной погрешности, обусловленной изменением напряжения этого источника.

Погрешность, обусловленная изменением температуры линии, термопары и указателя. В термоэлектрических термометрах для измерения термо-э.д.с. применяют как обычные милливольтметры, так и низкоомные компенсаторы с ручным или автоматическим уравновешиванием на .предел измерения до 100 мВ.

В тех случаях, когда термо-э.д.с. измеряется компенсатором, сопротивление цепи термо-э.д.с., как известно, роли не играет. В тех же случаях, когда термо-э.д.с. измеряется милливольтметром, может возникнуть погрешность, обусловленная изменением сопротивлений всех элементов, составляющих цепь термо-э.д.с.; поэтому необходимо стремиться к постоянному значению сопротивления проводов и самой термопары.

В отечественных термоэлектрических термометрах при их градуировке учитывается сопротивление внешней относительно милливольтметра цепи, т. е. проводов и термопары (Rпр + RТП), равное 5 Ом. Регулировка сопротивления этой внешней цепи осуществляется при помощи добавочной катушки сопротивления из манганина непосредственно при монтаже прибора.

Паразитные термо-э.д.с. возникают вследствие наличия неод-нородностей в материалах и по данным, приведенным в работе, могут составлять для различных материалов 10—100 мкВ. В частности, для платиновой проволоки при протяженности распределения температуры 30 мм и температурном градиенте величина паразитной термо-эдс составляет 10 мкВ.

1.4. ПРОМЫШЛЕННЫЕ ТЕРМОПАРЫ

Основные параметры термопар промышленного типа:

Таблица 2

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| Обозначение теомопары | Обозначение термоэлектродов | Материалы | Пределы измерения при длительном применении | Верхний предел измерений при кратковременном применении |
| ТПП | ПП-1 | Платинородий(10% родия) платина | От -20 до 1300 | 1600 |
| ТПР | ПР-30 | Платинородий(30% родия) | 300-1600 | 1800 |
| ТХА | ХА | Хромель-алюмель | -50-1000 | 1300 |
| ТХК | ХК | Хромель-копель | -50-600 | 800 |

Для измерения температур ниже — 50° С могут найти применение специальные термопары, например медь — константан (до ~- 270° С), медь — копель (до — 200° С) и т. д. Для измерения температур выше 1300—1800° С изготавливаются термопары на основе тугоплавких металлов: иридий—ренийиридий (до 2100° С), вольфрам—рений (до 2500° С), на основе карбидов переходных металлов — титана, циркония, ниобия, талия, гафния  
(теоретически до 3000—3500° С), на основе углеродистых и графитовых волокон.

Градуировочные характеристики термопар основных типов приведены в табл. 6. В этой таблице указана температура рабочего спая в градусах  
Цельсия и приведены величины термо-э.д.с. соответствующих термопар в милливольтах при температуре свободных концов 0° С.

Таблица 3

|  |  |
| --- | --- |
| Обозначение градуировки | Температура рабочего спая |
| ХА | 12.2, 16.40, 20.65, 24.91, 33.32, 41.26, 48.87 |
| ПП-1 | 2.31, 3.249, 4.128, 5.220, 7.325, 9.564, 11.92, 14.33, 16.71 |
| ПР-30 | 4.913, 6.902, 9.109, 11.47, 13.92 |

Допускаются отклонения реальных термо-э.д.с. от значений, приведенных в табл. 6, на величины, указанные в табл. 7.

Таблица 4

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Обозначение градуировки | Диапазон температур | Наибольшее отклонение температур |
| ПП-1 | -20 до +300 | 0,01 |
| ПР-30 | +300 до +1800 | 0,01 |
| ХА | -50 до +300 | 0,16 |
| ХК | -50 до +300 | 0,20 |

Конструкция термопары промышленного типа.Это термопара с термоэлектродами из неблагородных металлов, расположенными в составной защитной трубе с подвижным фланцем для ее крепления. Рабочий спай термопары изолирован наконечником. Термоэлектроды изолированы брусами. Защитная труба состоит из рабочего и нерабочего участков. Передвижной фланец крепится к трубе винтом. Головка термопары имеет литой корпус с крышкой, закрепленной винтами; В головке укреплены фарфоровые колодки (винтами) плавающими (незакрепленными) зажимами, которые позволяют термоэлектродам удлиняться под воздействием температуры без возникновения механических напряжений, ведущих к быстрому разрушению термоэлектродов. Термоэлектроды крепятся к этим зажимам винтами, а соединительные провода — винтами. Эти провода проходят через штуцер с асбестовым уплотнением.

Основным вопросом при конструировании термопар промышленного типа является выбор материала защитной трубы (арматуры) и изоляции. Защитная арматура термопары должна оградить ее от воздействия горячих, химически агрессивных газов, быстро разрушающих термопару. Поэтому арматура должна быть газонепроницаемой, хорошо проводящей тепло, механически стойкой и жароупорной. Кроме того, при нагревании она не должна выделять газов или паров, вредных для термоэлектродов.

При температурах, не превышающих 600° С, обычно применяют стальные трубы без шва, при более высоких температурах(до1100° С)— защитные трубы из легированных сталей. Для уменьшения стоимости защитных труб их часто выполняют составными (сварными) из двух частей: рабочего участка трубы из нержавеющей стали и нерабочего из обычной стали.

Для термопар из благородных металлов часто применяют неметаллические трубы (кварцевые, фарфоровые и т. д.), однако такие трубы механически непрочны и дороги. Фарфоровые трубы надлежащего состава можно использовать при температурах до 1300— 1400°С.

Применяя защитные трубы из карбида кремния и графита, необходимо учитывать, что при нагревании они выделяют восстанавливающие газы; поэтому помещаемые в них термопары (особенно термопары на платиновой основе) должны быть защищены дополнительно газонепроницаемым чехлом.

В качестве изоляции термоэлектродов друг от друга применяют асбестдо300° С, кварцевые трубки или бусы до 1000° С, фарфоровые трубы 1300 С. Для лабораторных термопар, используемых при измерении низких температур, применяют также теплостойкую резину до 150° С, шелк до 100—120°  
С, эмаль до 150—200 °С.

Инерционность термопар и термометров характеризуется их постоянной времени Т, определяемой как время, необходимое Для того, чтобы изменение выходной величины преобразователя, перенесенного из среды с температурой  
30—35 °С в сосуд с интенсивно перемешиваемой водой с температурой 15—20 °С, достигло 63% от установившегося значения перепада. Различают термопары и термометры сопротивления малоинерционные (Ттп < 40 с для термопары и Ттс <  
9 с для термометра), средней инерционности Ттп < 60 с, Ттc < 80 с), большой инерционности (Ттп < 3,5 мин, Ттc < 4 мин) и ненормированной инерционности.

2. Методы контактных электроизмерений различных диапазонов температур.

2.3. МЕТОДЫ КОНТАКТНЫХ ЭЛЕКТРОИЗМЕРЕНИЙ

СРЕДНИХ И ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУР С ПОМОЩЬЮ ТЕРМОПАР

Средними в термометрии считаются температуры от 500 (начало свечения) до 1600 °С (белое каление), а высокими— от 1600 до 2500°С, до которых удается распространить термоэлектрический метод с использованием высокотемпературных, жаростойких материалов.

Принцип термоэлектрического метода и основные свойства термоэлектродов были рассмотрены выше в п. 1. Основным вопросом при использовании этого метода для измерения средних и высоких температур является защита термоэлектродов от разрушающего химического и термического воздействия среды. Для этого термопары снабжаются защитной арматурой в виде чехлов, трубок или колпачков из огнеупорных материалов. Главное требование к защитной оболочке — высокая плотность строения и температурная стойкость.  
При измерении температур ниже 1300 °С используются фарфоровые чехлы, при более высоких температурах — колпачки из тугоплавких материалов (такие, как корунд, окиси алюминия, бериллия или тория), заполненные инертным газом.

Зависимость срока службы термопар от пористости защитной оболочки.

При измерении температуры поверхности тел особенную трудность составляет контакт рабочего спая термопары с поверхностью нагретого тела.  
Для улучшения контакта используются термопары, рабочий спай которых выполнен в виде ленты или пластины. Такая конфигурация рабочего спая при деформации позволяет воспроизводить поверхность объекта измерения.

Для-измерения температур до 2000—2500 °С используются вольфрамовые или иридиевые термопары. Особенностью их применения является измерение в вакууме, в инертной или восстановительной средах, так как на вэздухе они окисляются. Чувствительность воль-фрамо-молибденовой термопары составляет 7 мкВ/К, а вольфрамо-рениевой 13 мкВ/К.

В условиях высоких температур применяются термопары из огнеупорных материалов (пары карбид титана — графит,карбид циркония — борид циркония и ди-силицид молибдена — дисилицид вольфрама). В таких термопарах внутри цилиндрического электрода (диаметр около 15 мм) имеется второй электрод—стержень, соединенный с первым электродом на одном конце трубки.  
Чувствительность термопар из огнеупорных материалов достигает 70 мкВ/К, однако их применение ограничено инертными и восстановительными средами.

Для измерения температуры расплавленного металла термопарами из благородных металлов используется метод, заключающийся в погружении термопары в металл на время, безопасное для ее работоспособности. При этом термопара на короткое время (0,4—0,6 с) погружается в контролируемую среду, и измеряется скорость нарастания температуры рабочего спая. Зная зависимость между скоростью нагрева термопары (ее тепловую инерционность) и температурной среды, можно рассчитать значение измеряемой температуры. Этот метод применяется для измерения расплавленного металла (2000-2500 С) и газового потока (1800 С).