

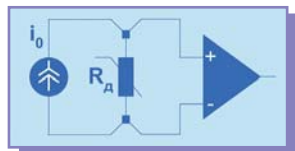


Термометры сопротивления, Термисторы и Термопары

Денисенко В.В., Халявко А.Н., НИЛ АП, г.Таганрог, Россия

Резистивные термопреобразователи (резистивные термодатчики, Resistance-Temperature Detector - RTD) представляют собой приборы, чувствительные к изменению температуры их чувствительного элемента, в качестве которого обычно используются металлы - медь, никель или платина. Сопротивление таких датчиков (обычно 100 Ом при температуре 0°C) увеличивается с температурой, т.е. они имеют положительный температурный коэффициент сопротивления (ТКС). По сравнению с другими датчиками RTD отличаются высокой точностью. Некоторые из них позволяют выполнять измерения с точностью 0,026°C. Наиболее распространенные датчики имеют временную нестабильность сопротивления менее чем 0,1°C в год, а отдельные экземпляры - до 0,0025°C в год.

ТКС платины равен $3,911 \cdot 10^{-3} \text{ 1/}^\circ\text{C}$, меди - $4,3 \cdot 10^{-3} \text{ 1/}^\circ\text{C}$. Таким образом, датчик с сопротивлением 100 Ом имеет температурный коэффициент соответственно, 0,39 Ом/°C и 0,43 Ом/°C. В связи с этим при проектировании устройств измерения температуры с помощью датчиков сопротивления необходимо учитывать (компенсировать) сопротивление подводящих проводов. Для этого используют две пары проводов, одна из которых служит для под-



ведения к датчику калиброванного тока возбуждения, а вторая - для измерения падения напряжения на нем, причем ток по второй паре проводов не протекает.

Большой ток возбуждения, с одной стороны, увеличивает температурную чувствительность датчика, пропорциональную току возбуждения, а с другой стороны, вызывает саморазогрев датчика, что приводит к дополнительной погрешности. Поэтому величину тока возбуждения выбирают исходя из конкретных условий измерения. В частности, принципиальное значение имеет теплопроводность среды (воздух, вода, контакт с металлом), в которой находится датчик. Рекомендуемое значение тока возбуждения указывается изготовителем датчика. Типовые значения составляют 250 мкА для платиновых и никелиевых преобразователей и 1 мА для медных.

Сопротивление датчика RTD изменяется с температурой линейно:

тип датчика	номинальное сопротивление при 0°C	обозначение характеристики	допустимое отклонение сопротивления от номинального при 0°C	диапазон измеряемых температур
ТСР	50 Ом	50П	±0.05..±0.08%	-250°C...+1000°C
	100 Ом	100П		
ТСМ	50 Ом	50М	±0.1..±1.0%	-50°C...+200°C
	100 Ом	100М		-200°C...+200°C

$$R_d = R_0 (1 + \alpha \Delta T),$$

где R_0 - сопротивление при температуре T_0 , α - ТКС. Для учета более тонких эффектов, вызывающих не-большие отклонения температурной зависимости сопротивления от прямой линии, используют различные аппроксимации. Наиболее хорошие результаты дает аппроксимация Callendar-Van Dusen:

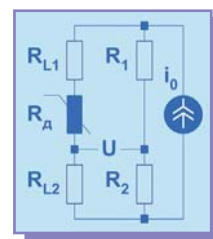
$$R_d = R_0 [1 + C_1 T + C_2 T^2 + C_3 (T - 100)^3],$$

где коэффициенты C_1 , C_2 и C_3 находятся, например, методом наименьших квадратов.

В четырехпроводной схеме включения датчика ток возбуждения задается с помощью источника тока, внутреннее сопротивление которого очень большое и сопротивление подводящих проводов не влияет на величину тока через термопреобразователь. В этом случае напряжение на выходе дифференциального усилителя будет равно $U = R_d \cdot i_0$ независимо от сопротивления подводящих проводов, поскольку входное сопротивление дифференциального усилителя нетрудно сделать практически бесконечно большим. Тогда значение измеряемой температуры можно описать выражением:

$$T = T_0 + [(U/i_0) - R_0] / (\alpha \cdot R_0)$$

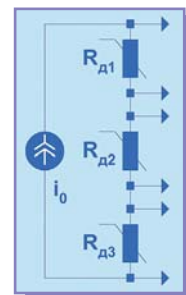
Можно сэкономить один провод из четырех, если использовать для компенсации сопротивлений подводящих проводов R_{L1} и R_{L2} мост Ватсона. При закороченном термодатчике напряжение на выходе моста подбирают равным нулю, что достигается соответствующим выбором отношения сопротивлений R_1/R_2 .

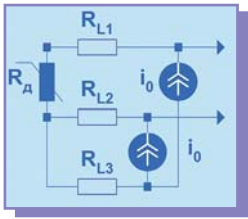


Но широко используется другая трехпроводная схема включения. Она содержит два генератора тока и предполагает, что сопротивление соединительных проводов равны.

При невысоких требованиях к точности измерения и в случае, когда термодатчики расположены недалеко один от другого, удобна схема с последовательным их включением и одним

источником тока возбуждения. Недостаток этой схемы в том, что напряжение нижнего по схеме датчика является





синфазной помехой для всех датчиков, расположенных выше. Поэтому для получения хороших результатов необходимо использовать инструментальный усилитель с большим коэффициентом подавления синфазного сигнала.

Для устранения уровня шумов в

сигнале от термодатчика используют фильтр нижних частот с полосой 4...10 Гц. Причем для эффективного подавления помех с частотой питающей сети 50 Гц ФНЧ должен иметь по крайней мере третий порядок.

При токе возбуждения 1 мА и ТКС 0,2 Ом/°С температурный коэффициент напряжения на термодатчике будет равен 0,2 мВ/°С. Поэтому для достижения потенциальной разрешающей способности термодатчика 0,1°С и при использовании 12-разрядного АЦП с величиной МЗР 2,5 мВ необходим усилитель с коэффициентом усиления 125. Этот усилитель желательно располагать в непосредственной близости от термопреобразователя.

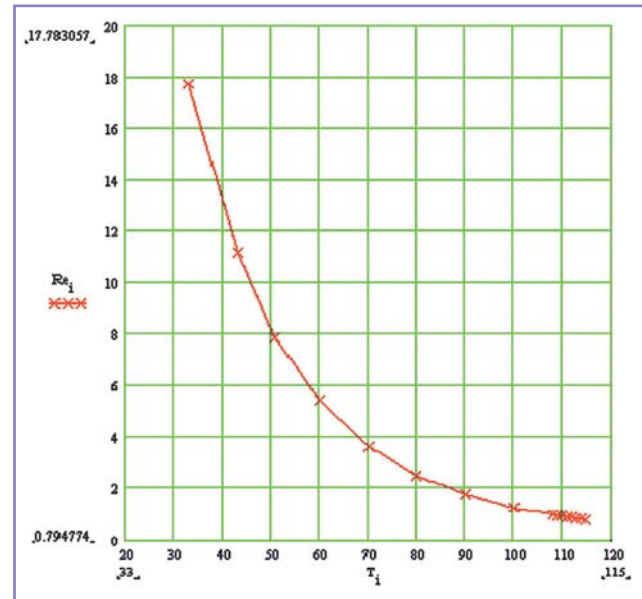
тип датчика	номинальное сопротивление при 0 °С	обозначение характеристики	диапазон измеряемых температур, °С
ТСП	1	1	-50..+400
ТСП	5	5	-100..+1100
ТСП	10	10	-200..+1000
ТСП	(46)	градуировка 21	-260..+1000
ТСП	50	50	-260..+1000
ТСП	100	100	-260..+1000
ТСП	500	500	-260..+300
ТСП	10	10	-50..+200
ТСП	50	50	-50..+180
ТСП	(53)	градуировка 23	-50..+180
ТСП	100	100	-100..+200

В соответствии с ГОСТ 6651-94 для резистивных термопреобразователей существует пять классов точности. Так у платиновых термопреобразователей первого класса точности отклонение сопротивления не превышает ±0.05 Ом от R₀ при 0°С. Для промышленных измерений обычно используются терморезисторы второго и третьего класса, у которых отклонение не превышает ±0.1 Ом и ±0.2 Ом соответственно.

Для измерения температуры широко применяются и полупроводниковые терморезисторы, именуемые термисторами. Их сопротивление сильно изменяется в зависимости от температуры. Термисторы имеют нелинейную вольтамперную характеристику и отрицательный ТКС. Существуют термисторы и с положительным ТКС, называемые позисторами.

Терморезисторы изготавливаются на основе полупроводниковых оксидов металлов, спрессованных для получения заданной формы. Механическая прочность и защита от воздействий окружающей среды обеспечивается с помощью металлического корпуса или защитного изолирующего слоя. Термисторы по сравнению с другими типами температурных датчиков имеют очень высокую чувствительность. Типовое значение ТКС для термисторов составляет -5% на градус, в то время как для платинового термометра сопротивления ТКС составляет 0,4% на градус. Важным преимуществом термисторов является их большое сопротивление. Это во многом устраняет проблему, связанную с падением напряжения на подводящих проводах, как при использовании RTD, и проблему, свя-

занную с необходимостью большого усиления сигнала, как при работе с термопарами. Но есть у термисторов и недостаток. Типовой диапазон измеряемых с помощью термисторов температур достаточно узок, -60..+150°С, для некоторых образцов он расширен до -60...+300°С.



Характеристика термистора ММТ-1 22 КОм

Зависимость сопротивления термисторов от температуры удовлетворительно описывается экспоненциальной функцией:

$$R_T = A \cdot \exp(B/T),$$

где **A** - сопротивление при бесконечно большой температуре, а **B** - коэффициент температурной чувствительности, значения которого обычно находятся в диапазоне 1200-16000.

Из приведенного выражения можно получить связь между ТКС α и коэффициентом температурной чувствительности в виде:

$$\alpha = -B/T$$

В справочниках величину ТКС обычно приводят для температуры 20°С (293°K).

эквивалент по шкале	Цельсия	Кельвина
шкала Цельсия	x°С	(x+273.15) °K
шкала Реомюра	x°R	((5/4)x+273,15) °K
шкала Фаренгейта	x°F	((5/9)x+255.38) °K

При протекании тока через термистор он нагревается, а это увеличивает погрешность измерений. Поэтому при выборе термистора необходимо учитывать его коэффициент рассеяния, который определяется как мощность, приводящая к нагреву датчика на 1 градус относительно температуры окружающей среды. Для снижения погрешности, вызванной собственным разогревом термистора, необходимо увеличивать площадь его поверхности. Однако, это приводит к увеличению тепловой инерционности, которая характеризуется величиной постоянной времени. Постоянная времени терморезистора равна времени, в течение которого его температура изменяется в e раз (на 63%) при создании перепада температуры 100° в воз-

душной среде (постоянная времени по воздуху) или жидкости (воде). Типовые значения постоянных времени лежат в диапазоне от десятых долей секунды до нескольких минут.

Главный недостаток термисторов - нелинейность характеристики. В современных технических средствах эта проблема решается программно, с помощью микроконтроллера или компьютера. При этом используют нелинейные аппроксимирующие функции, коэффициенты которых подбираются методом наименьших квадратов или другими методами параметрической идентификации. Классический пример - формула Стейнхард-Харта:

$$T=1/\{C_0+C_1 \ln(R_T)+C_2 [\ln R_T]^3\}$$

Коэффициенты этого уравнения подбираются из условия наилучшего приближения к экспериментально полученной зависимости или поставляются изготовителем датчика.

Измерительные цепи для термисторов подобны упомянутым схемам включения термометров сопротивления. Главное что следует отметить - чувствительность схемы измерения температуры пропорциональна величине тока через термистор. Поэтому этот ток следует выбирать как можно больше, но так, чтобы погрешность, вносимая эффектом саморазогрева термистора, находилась в допустимых пределах. Перегрев термистора на 1 градус вызывается мощностью, равной его коэффициенту рассеяния. А коэффициент рассеяния существенно зависит от теплопроводности среды, в которой находится терморезистор (вода, воздух, контакт с металлом). Это означает, что необходимо принимать во внимание условия, при которых он аттестовался изготовителем. При использовании термистора в иной среде необходимо предварительно измерять коэффициент рассеяния. Например, если на термисторе рассеивается мощность 2 мВт, а его коэффициент рассеяния равен 10 мВт/град, то саморазогрев термистора составит 0,2 град. Если требуемая погрешность измерения должна быть меньше, следует уменьшить ток через термистор и улучшить экранирование токоподводящих проводов, поскольку при уменьшении тока ухудшается отношение сигнал/помеха.

А теперь о термопарах. Основным отличием термопар от описанных выше датчиков является широкий температурный диапазон (от -270 до +3000°C) и практически нулевое выходное сопротивление, благодаря которому существенно снижаются емкостные наводки на датчик и соединительные провода.

Принцип действия термопары основан на эффекте термоэлектричества, открытым немецким физиком Т. Зебеком в 1821 г. Если соединить два провода из разнородных металлов, то между их концами возникнет электродвижущая сила величиной порядка милливольт, с температурным коэффициентом около 50 мкВ на градус. Такие соединения называются термопарами. Зависимость напряжения от температуры нелинейна, однако в небольшом диапазоне температур термо-э.д.с. пропорциональна разности температур спаев T_1 и T_2 :

$$\text{эдс} = S (T_2 - T_1),$$

где S - коэффициент Зеебека.

Если температуры спаев различаются и температура одного из спаев известна (например, измерена с помощью термометра или терморезистора), то температуру

второго спая, т.е. измеряемую, можно найти из уравнения. А для того, чтобы упростить процесс измерения, температуру холодного спая следует заставить стабилизировать. Для точных измерений или поверки термопар используют ванночку со льдом. Однако в большинстве применений использование даже недорогого терморезисторного датчика позволяет получить хорошие результаты с помощью "программной" компенсации.

При подключении к термопаре внешней электрической цепи появляются новые контакты разнородных металлов, которые вводят в измерительную цепь дополнительные эдс. Но, например, термо-эдс двух контактов медь-константан, включенных встречно, компенсируют друг друга. Это позволяет, применив специальные удлинительные или компенсационные проводники, использовать термопару на большом удалении от приборов регистрации.

Если по теореме об эквивалентном генераторе электрической цепи один спай заменить источником напряжения, а затем перенести этот источник к вольтметру, то получим окончательно измерительную цепь, которая используется в большинстве приборов для измерения температуры на основе термопар.

Величина эдс источника $E_{\text{комп}}$ является функцией температуры холодного спая T_1 . "Холодным спаем" в этом случае являются контакты между медью и железом и медью и константаном. Эти контакты должны иметь одинаковую температуру! Таким образом, алгоритм измерения температуры должен состоять из следующих шагов:

- измерение температуры холодного спая;
- преобразование этой температуры в эквивалентное напряжение на выводах холодного спая термопары;
- суммирование этого напряжения с измеренным напряжением на выводах термопары;
- преобразование полученного напряжения в температуру, используя градуировочную таблицу термопары или линеаризирующее уравнение.

Зависимость напряжения на выходе термопары от температуры является нелинейной. Поэтому для нахождения температуры по измеренному значению напряжения необходимо использовать таблицу или нелинейную функцию, аппроксимирующую табличные данные. Для аналитической аппроксимации табличных значений обычно используют полином вида

$$T=C_0+C_1V+C_2V^2+\dots+C_nV^n,$$

где V - измеренное напряжение в милливольт; T - температура, °C;

$C_0 \dots C_n$ - коэффициенты полинома, которые индивидуальны для каждого типа термопары.

Для ряда стандартных термопар эти коэффициенты установлены стандартом NIST (National Institute of Standards and Technology). Коэффициенты аппроксимирующего полинома для термопар типа E, J, K, R, S и T, приведенные в таблице 1, получены при условии, что холодный спай термопары находится при температуре 0°C.

Для обратного перехода от температуры к напряжению используют аналогичную полиномиальную аппроксимацию



ТАБЛИЦА 1

	тип термопары					
	E	J	K	R	S	T
	0..1000°C	0..760°C	0..500°C	-50..250°C	-50..250°C	0..400°C
C₀	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
C₁	1.7057035E-2	1.978425E-2	2.508355E-2	1.8891380E-1	1.84949460E-1	2.592800E-2
C₂	-2.3301759E-2	-2.001204E-7	7.860106E-8	-93835290E-5	-8.00504062E-5	-7.602961E-7
C₃	6.5435585E-12	1.036969E-11	-2.503131E-10	1.3068619E-7	1.02237430E-7	4.637791E-11
C₄	-7.3562749E-17	-2.549687E-16	8.315270E-14	-2.2703580E-10	-1.52248592E-10	-2.165394E-15
C₅	-1.7896001E-21	3.585153E-16	-1.228034E-17	3.5145659E-13	1.88821343E-13	6.048144E-20
C₆	8.4036165E-26	-5.344285E-26	9.804036E-22	-3.8953900E-16	-1.59085941E-16	-7.293422E-25
C₇	-1.3735879E-30	5.099890E-31	-4.413030E-26	2.8239471E-19	8.23027880E-20	
C₈	1.0629823E-35		1.057734E-30	-1.2607281E-22	-2.34181944E-23	
C₉	-3.2447087E-41		-1.052755E-35	3.1353611E-26	.79786260E-27	
C₁₀				-3.3187769E-30		
	±0.02°C	±0.05°C	±0.05°C	±0.02°C	±0.02°C	±0.03°C
	Погрешность					

$$T=C_0 + C_1V + C_2V^2 + \dots + C_9V^9,$$

коэффициенты которой приведены в таблице 2. Этой таблицей пользуются для точной компенсации температуры холодного спая. Следует заметить, что для термопар типа K уравнение преобразования имеет несколько иной вид:

$$T=C_0 + C_1V + C_2V^2 + \dots + C_9V^9 + 118.597 \cdot \exp[(-1.183432 \cdot 10^{-4}) \cdot (T-126.9686)^2]$$

Сварка проводов, изготовленных из разных металлов, выполняется таким образом, чтобы получилось небольшое по размеру соединение - спай. Провода можно просто скрутить, однако такое соединение ненадежно и имеет большой уровень шумов. Сварку металлов иногда заменяют пайкой, однако верхний температурный диапазон такой термопары ограничен температурой плавления припоя. При температурах, близких к температуре плавления припоя, контакт разнородных металлов в термопаре может нарушаться. Термопары, изготовленные с помощью сварки, выдерживают более высокие температуры, однако химический состав термопары и структура металла в месте сварки могут нарушаться, что приводит к разбросу температурных коэффициентов термопар. Под действием высоких температур может произойти раскалибровка термопары из-за изменения диффузии компонентов металла в месте сварки. В таких случаях термопару следует откалибровать заново или заменить.

Промышленностью выпускаются термопары трех различных конструкций: с открытым спаем, со спаем, расположенным внутри корпуса и изолированным от него, и со спаем, расположенным внутри корпуса и соединенным с ним. Термопары с открытым контактом имеют малую постоянную времени, но

плохую коррозионную стойкость. Термопары двух других типов применимы для измерения температуры в агрессивных средах. В таблице 3 приведены типы термопар и их маркировка в соответствии со стандартом ANSI и ГОСТ.

Особенностью термопар по сравнению с другими

типами термодатчиков является то, что температурный коэффициент зависит только от материала, из которого изготовлена термопара и не зависит от ее конструкции (термопары выполняются в форме щупа, прокладки, бронированного зонда, и т.п.). Это делает термопары взаимозаменяемыми без дополнительной подстройки.

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

Основная проблема построения измерительной схемы на базе термопары связана с ее низким выходным напряжением (чувствительность единицы и десятки мкВ/°C), так как синфазные помехи промышленной частоты 50 Гц и радиопомехи, наведенные на элементах измерительной цепи, намного превышают это значение. Поэтому очень важно хорошо экранировать провода, идущие от термопары к системе сбора данных. Термопара должна быть подключена витой парой проводов, помещенных в общий экран. Если провод, идущий к термопаре, достаточно длинный (несколько сотен метров), то наилучшие результаты получаются, если предварительно усилить сигнал термопары и уже усиленный сигнал передавать на большое расстояние. При этом электромагнитные наводки становятся малы по сравнению с усиленным сигналом от термопары, что увеличивает достоверность получаемых результатов.

ТАБЛИЦА 2

	тип термопары					
	E	J	K	R	S	T
	0..1000°C	-210..760°C	0..1372°C	-50..1064°C	-50..1064°C	0..400°C
C₀	0.0	0.0	-17.600413686	0.0	0.0	0.0
C₁	58.665508710	50.38118782	38.921204975	5.28961729765	5.40313308631	38.748106364
C₂	4.503227558E-2	3.047583693E-2	1.85587700E-2	1.3916658978E-2	1.2593428974E-2	3.32922279E-2
C₃	2.890840721E-5	-8.56810657E-5	-9.9457593E-5	-2.388556930E-5	-2.324779687E-5	2.06182434E-4
C₄	-3.30568967E-7	1.322819530E-7	3.18409457E-7	3.5691600106E-8	3.2202882304E-8	-2.18822568E-6
C₅	6.50244033E-10	-1.7052958E-10	-5.607284E-10	-4.62347666E-11	-3.314651964E-11	1.09968809E-8
C₆	-1.9197496E-13	2.09480907E-13	5.6075059E-13	5.007774410E-14	2.557442518E-14	-3.0815759E-11
C₇	-1.2536600E-15	-1.2538395E-16	-3.202072E-16	-3.73105886E-17	-1.25068871E-17	4.54791353E-14
C₈	2.14892176E-18	1.56317257E-20	9.7151147E-20	1.577164824E-20	2.714431761E-21	-2.7512902E-17
C₉	-1.4388042E-21		-1.210472E-23	-2.81038625E-24		
C₁₀	3.59608995E-25		*			

ТАБЛИЦА 3

тип термопары		материал положительного электрода	материал отрицательного электрода	максимальная погрешность	максимальная температура	температурный коэфф. при +20°C	выходное напряжение, при +100°C
J		железо Fe	константан Cu-Ni	2.2°C (0.75%)	+760°C	51.45	5.268
K	ТХА	хромель Cr-Ni	алюмель Ni-Al	2.2°C (0.75%), > 0°C 2.2°C (2%), < 0°C	+1370°C	40.28	4.095
T		Медь Cu	константан Cu-Ni	1°C (0.75%), > 0°C, 1°C (1.5%), < 0°C	+400°C	40.28	4.277
E		хромель Cr-Ni	константан Cu-Ni	1.7°C (0.5%), > 0°C 1.7°C (1%), < 0°C	+1000°C	60.48	6.317
N		никросил Ni-Cr-Si	нисил Ni-Si-Mg	2.2°C (0.75%), > 0°C 2.2°C (2%), < 0°C	-	-	-
R		платина-родий Pt-Rh (13% Rh)	платина Pt	1.5°C (0.25%)	+1750°C	5.8	0.647
S	ТПП	платина-родий Pt-Rh (10% Rh)	платина Pt	1.5°C (0.25%)	+1750°C	5.88	0.645
B	ТПР	платина-родий Pt-Rh (30% Rh)	платина-родий Pt-Rh (6% Rh)	0.5%, > +800°C	+1800°C	-	0.033
C	ТВР	вольфрам-рений W-Re (5% Re)	вольфрам-рений W-Re (26% Re)	1%, до 2320°C	4.5°C, до 425°C	-	-

Для компенсации температуры холодного спая обычно используют два способа. Первый способ состоит в том, что провода, идущие от термопары к системе сбора данных, выполняются термопарным проводом, т.е. проводом, изготовленным из того же материала, что и электроды термопары. При этом "холодные спаи" всех термопар (если их несколько) оказываются расположенными в одном месте и температуры всех "холодных спаев" одинаковы. В этом случае можно использовать один общий термодатчик, измеряющий температуру холодных спаев. Этот способ удобен, когда все термопары расположены недалеко друг от друга и от системы сбора данных. Второй способ состоит в том, что для каждой термопары используют свой измеритель температуры холодного спая. Это позволяет применить обычные провода для подсоединения термопары к системе сбора данных, однако одновременно с ними необходимо подвести и сигнал от термопреобразователя, который регистрирует температуру холодного спая. Такой способ удобен, когда термопары пространственно разнесены одна от другой на большое расстояние.

Если термопара в рабочем режиме находится под высоким напряжением или может случайно оказаться под напряжением, необходимо использовать изолирующий усилитель.

Точность термопары зависит от химического состава ее материала. Внешние факторы, такие как давление, коррозия, радиация могут изменить кристаллическую структуру или химический состав материала и вносят погрешность в результат измерения.

Для калибровки термопреобразователей используют международную практическую температурную шкалу. В этой шкале температура выражается в градусах стоградусной шкалы °C. В основе шкалы лежат 6 основных постоянных точек (отмечены в таблице звездочкой). Точки, не отмеченные звездочкой, принадлежат к числу вторичных постоянных точек шкалы.

КОНТАКТЫ:
т. (107-86344) -2-14-57
e-mail: info@rlda.ru

температура равновесия между жидким кислородом и его паром (точка кипения кислорода)*	-182.97°C	температура затвердевания свинца	327.3°C
температура равновесия между твердым углеродным ангидридом и его паром	-78.5°C	температура равновесия между ртутью и ее паром	356.58°C
температура затвердевания ртути	-38.87°C	температура затвердевания цинка	419.505°C
точка плавления водяного льда	0.000°C	точка кипения серы*	444.6°C
температура равновесия между льдом, водой и ее паром (тройная точка)*	+0.01°C	температура затвердевания алюминия	660.1°C
температура превращения Na ₂ SO ₄ *10H ₂ O	32.38°C	точка плавления серебра*	960.8°C
точка кипения воды*	100°C	точка плавления золота*	1063°C
температура тройной точки бензойной кислоты	122.36°C	температура затвердевания меди в восстановительной среде	1083°C
температура равновесия между нафталином и его паром	218.0°C	температура затвердевания никеля	1453°C
температура затвердевания олова	231.91°C	температура затвердевания кобальта	1492°C
температура равновесия между бензофеноном и его паром	305.9°C	температура затвердевания палладия	1552°C
температура затвердевания кадмия	321.03°C	температура затвердевания платины	1769°C
		температура затвердевания родия	1960°C
		температура затвердевания иридия	2443°C
		температура затвердевания вольфрама	3380°C

* - основные постоянные точки температурной шкалы