ГОСУДАРСТВЕННЫЙ СТАНДАРТ
СОЮЗА ССР

ГОСУДАРСТВЕННАЯ СИСТЕМА ОБЕСПЕЧЕНИЯ
ЕДИНСТВА ИЗМЕРЕНИЙ

ШКАЛЫ ТЕМПЕРАТУРНЫЕ ПРАКТИЧЕСКИЕ

ГОСТ 8.157—75

Издание официальное

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ КОМИТЕТ СССР ПО СТАНДАРТАМ
Москва

gost.e-ecolog.ru

УДК 536.5.081 : 006 : 354 Группа Т80

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ СТАНДАРТ СОЮЗА ССР

Государственная система обеспечения единства измерений

ШКАЛЫ ТЕМПЕРАТУРНЫЕ ПРАКТИЧЕСКИЕ

State system for ensuring the uniformity of measurements.
Practical temperature scales

ГОСТ 8.157—75

Взамен
ГОСТ 8550—61
[в части МПТШ—48] и
ГОСТ 12442—66

Постановлением Государственного комитета стандартов Совета Министров СССР от 12 мая 1975 г. № 1246 срок введения установлен

с 01.01.76

Настоящий стандарт устанавливает практические температурные шкалы, предназначенные для обеспечения единства измерений температуры в диапазоне от 0,01 до 100000 К, и методы их осуществления.

В стандарте учтены рекомендации Международного комитета мер и весов и его Консультативного комитета по термометрии.

1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

1.1. Совокупность практических температурных шкал, установленных настоящим стандартом, образует единую систему температурных шкал, непрерывную от 0,01 до 100000 К. Практические температурные шкалы реализуются различными методами.

1.2. Практические температурные шкалы установлены таким образом, что температуры, измеренные по ним, насколько возможно близки к термодинамическим температурам.

1.3. Единицей температуры по практическим температурным шкалам, установленным настоящим стандартом, так же как и единицей термодинамической температуры, является кельвин (К).

1.4. Допускается применение единицы температуры — градуса Цельсия (°С). Между температурой T, выраженной в кельвинах, и температурой t, выраженной в градусах Цельсия, установлено соотношение

$$t = T - T_0, \qquad (1)$$

где $T_0 = 273{,}15$ К.

Издание официальное Перепечатка воспрещена

Переиздание. Декабрь 1985 г.

© Издательство стандартов, 1986

Градус Цельсия равен кельвину. Температурные разности выражаются в кельвинах или градусах Цельсия.

1.5. Методы воспроизведения практических температурных шкал, установленных настоящим стандартом, определяют требования к средствам измерений, входящим в состав государственных эталонов для соответствующих диапазонов температуры.

2. ПРАКТИЧЕСКИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫЕ ШКАЛЫ И МЕТОДЫ ИХ ОСУЩЕСТВЛЕНИЯ

2.1. Температурная шкала термометра магнитной восприимчивости ТШТМВ, основанная на зависимости магнитной восприимчивости χ термометра из церий-магниевого нитрата от температуры T, устанавливается для диапазона температур от 0,01 до 0,8 К. Эта зависимость выражается законом Кюри

$$\chi = C/T, \qquad (2)$$

где C — константа, определяемая градуировкой магнитного термометра.

2.2. Шкала ^{3}He 1962 г., основанная на зависимости давления p насыщенных паров изотопа гелия-3 от температуры T, устанавливается для диапазона температур от 0,8 до 1,5 К. Эта зависимость выражается уравнением

$$\ln p = 2{,}24846 \ln T - \frac{2{,}49174}{T} + 4{,}80386 - 0{,}286001T + 0{,}198608T^2 - 0{,}0502237T^3 + 0{,}00505486T^4, \qquad (3)$$

где p — давление в мм рт. ст. при 0°С и ускорении свободного падения, равном 9,80665 м/с^2.

2.3. Шкала ^{4}He 1958 г., основанная на зависимости давления p насыщенных паров изотопа гелия-4 температуры T, устанавливается для диапазона температур от 1,5 до 4,2К. Эта зависимость представлена в табличной форме (приложение 1).

2.4. Температурная шкала германиевого термометра электрического сопротивления ТШГТС, основанная на зависимости сопротивления R германиевого термометра от температуры T, устанавливается для диапазона температур от 4,2 до 13,81 К. Эта зависимость выражается соотношением

$$\lg R = \sum_{i=0}^{i=8} A_i (\lg T)^i, \qquad (4)$$

где A_i — константы, определяемые градуировкой германиевого термометра сопротивления по газовому термометру.

2.5. Международная практическая температурная шкала 1968 г. (МПТШ—68) устанавливается для диапазона температур от 13,81 до 6300К.

МПТШ—68 основана на ряде воспроизводимых равновесных состояний, которым приписаны определенные значения температур — основных реперных (постоянных) точек, и на эталонных приборах, градуированных при этих температурах. В интервалах между температурами реперных точек интерполяцию осуществляют по формулам, устанавливающим связь между показаниями эталонных приборов и значениями температуры.

Основные реперные точки реализуются как определенные состояния фазовых равновесий некоторых чистых веществ. Равновесные состояния и приписанные им значения температуры приведены в приложении 2.

2.5.1. В качестве эталонного прибора для области температур от 13,81 до 903,89К применяют платиновый термометр сопротивления. Относительное сопротивление W_T термометра определяют по формуле

$$W_T = R_T / R_{273,15K}, \quad (5)$$

где R_T — сопротивление термометра при температуре T;

$R_{273,15K}$ — сопротивление термометра при температуре 273,15К.

Относительное сопротивление термометра должно быть не менее

1,39250 при $T = 373,15K$.

Для области температур ниже 0°С соотношение между сопротивлением термометра и температурой определяют стандартной функцией и специальными уравнениями для вычисления поправок к этой функции (п. 2.5.2).

Для области от 0 до 630,74°С соотношение между сопротивлением термометра и температурой выражается двумя уравнениями в форме полиномов (п. 2.5.3).

В качестве эталонного прибора для температур от 630,74 до 1064,43°С применяют термоэлектрический термометр с электродами из платинородия (10% родия) и платины. Соотношение между электродвижущей силой и температурой выражается уравнением второй степени (п. 2.5.4).

Для области температур выше 1337,58К (1064,43°С) температуру определяют в соответствии с законом излучения Планка (п. 2.5.5.).

2.5.2. Для области от 13,81 до 273,15К температуру определяют по формуле

$$W_T = W_{ст}(T) + \Delta W(T), \quad (6)$$

где W_T — относительное сопротивление платинового термометра сопротивления;

$W_{ст}(T)$ — относительное сопротивление, соответствующее стандартной функции приложения 3 и таблице значений приложения 4.

Поправки $\Delta W\ (T)$ при температурах основных реперных точек получают из измеренных значений W_T и соответствующих значений $W_{ст}\ (T)$, приведенных в приложении 5. Отличия измеренных значений W_T от значений $W_{ст}\ (T)$ в реперных точках рассчитывают по уравнениям, приведенным в приложении 6.

Поправки $\Delta W\ (T)$ при промежуточных температурах определяют интерполяционными формулами. Область между 13,81 и 273,15К разделена на четыре участка, в каждом из которых $\Delta W\ (T)$ определяют полиномом от T. Константы в полиномах определяют из значений $\Delta W\ (T)$ в реперных точках и из условий равенства производных $d\Delta\ W(T)/dT$ на границах соседних температурных участков:

а) на участке от 13,81 до 20,28К поправочная функция имеет вид

$$\Delta W(T)=A_1+B_1T+C_1T^2+D_1T^3, \qquad (7)$$

где A_1, B_1, C_1 и D_1 — константы, определяемые из значений поправок ($\Delta W=W-W_{ст}$), измеренных в тройной точке равновесного водорода, при температуре 17,042К и в точке кипения равновесного водорода, а также из значения производной поправочной функции в точке кипения равновесного водорода, вычисленного по уравнению (8);

б) на участке от 20,28 до 54,361К поправочная функция имеет вид

$$\Delta W(T)=A_2+B_2T+C_2T^2+D_2T^3, \qquad (8)$$

где A_2, B_2, C_2 и D_2 — константы, определяемые из значений поправок ($\Delta W=W-W_{ст}$), измеренных в точке кипения равновесного водорода, в точке кипения неона и в тройной точке кислорода, а также из значения производной поправочной функции в тройной точке кислорода, вычисленного по уравнению 9;

в) на участке от 54,361 до 90,188К поправочная функция имеет вид

$$\Delta W(T)=A_3+B_3T+C_3T^2, \qquad (9)$$

где A_3, B_3 и C_3 — константы, определяемые из значений поправок ($\Delta W=W-W_{ст}$), измеренных в тройной точке и в точке кипения кислорода, а также из значения производной поправочной функции в точке кипения кислорода, вычисленного по уравнению 10;

г) на участке от 90,188 до 273,15К поправочная функция имеет вид

$$\Delta W(T)=A_4t+C_4t^3\ (t-100°C), \qquad (10)$$

где $t=T-273{,}15К$; A_4 и C_4 — константы, определяемые из значений поправок ($\Delta W=W-W_{ст}$), измеренных в точке кипения кислорода и в точке кипения воды или в точке затвердевания олова (примечание к приложению 2).

2.5.3. Для области от 0 до 630,74°С температуру t в градусах Цельсия рассчитывают по уравнению

$$t=t'+0{,}045\left(\frac{t'}{100°C}\right)\left(\frac{t'}{100°C}-1\right)\left(\frac{t'}{419{,}58°C}-1\right)\left(\frac{t'}{630{,}74°C}-1\right), \quad (11)$$

где $t'=\frac{1}{\alpha}\left[W(t')-1\right]+\delta\left(\frac{t'}{100°C}\right)\left(\frac{t'}{100°C}-1\right)$;

$$W(t')=R(t')/R(0°C); \quad (12а)$$

$R(t')$ и $R(0°C)$ — сопротивления термометра при температурах t' и 0°С соответственно;

α и δ — константы, определяемые измерением сопротивления в тройной точке воды, точке кипения воды или затвердевания олова (примечание к приложению 2) и точке затвердевания цинка.

Уравнение (12а) эквивалентно уравнению

$$W(t')=1+At'+Bt'^2, \quad (12б)$$

где $A=\alpha(1+\delta/100°C)$; $B=-10^{-4}\alpha\cdot\delta°C^{-2}$.

2.5.4. Для области от 630,74 до 1064,43°С температуру рассчитывают по уравнению

$$E_t=a+bt+ct^2, \quad (13)$$

где E_t — электродвижущая сила эталонного платинородий-платинового термоэлектрического термометра, один спай которого находится при температуре 0°С, а другой — при температуре t;

a, b, c — константы, вычисляемые по значениям E при температуре 630,74±0,2°С, измеряемой платиновым термометром сопротивления, и в точках затвердевания серебра и золота.

Платиновый электрод эталонного термоэлектрического термометра должен иметь относительное сопротивление W (100°С) не менее 1,3920. Платинородиевый электрод должен содержать 10% родия и 90% платины.

Термоэлектрический термометр должен быть таким, чтобы значения электродвижущей силы $E_{(630,74°C)}$, $E_{(961,93°C)}$ и $E_{(1064,43°C)}$ удовлетворяли следующим соотношениям в микровольтах:

$$E_{(1064,43°C)}=10300\pm50; \quad (14)$$

$$E_{(1064,43°C)}-E_{(961,93°C)}=1183+0{,}158\left[E_{(1064,43°C)}-10300\right]\pm4; \quad (15)$$

$$E_{(1064,43°C)}-E_{(630,74°C)}=4{,}766+0{,}631\left[E_{(1064,43°C)}-10300\right]\pm8. \quad (16)$$

2.5.5. Для области выше 1337,58К (1064,43°С) температуру T определяют по уравнению

$$\frac{L_\lambda\ (T)}{L_\lambda\ [T(\mathrm{Au})]} = \frac{\exp\left[\dfrac{C_2}{\lambda T(\mathrm{Au})}\right]-1}{\exp\left[\dfrac{C_2}{\lambda T}\right]-1}, \qquad (17)$$

где $L_\lambda\ (T)$ и $L_\lambda\ [T(\mathrm{Au})]$ — спектральные плотности энергии излучения черного тела для длины волны λ при температуре T и в точке затвердевания золота $T(\mathrm{Au})$. Значение константы $C_2 = 0{,}014388$ м·К.

2.5.6. Воспроизведение МПТШ—68 осуществляется аппаратурой, методами и технологией для реализации реперных точек и эталонными приборами, соответствующими рекомендациями, указанными в справочном приложении 7.

2.5.7. Ориентировочные значения расхождений между значениями по МПТШ—68 и МПТШ—48 приведены в справочном приложении 8.

2.6. Температурная шкала пирометра микроволнового излучения (ТШПМИ), основанная на зависимости спектральной плотности энергии излучения $L(T)$ черного тела от температуры T в микроволновом диапазоне излучения, устанавливается для диапазона температур от 6300 до 100000 К.

Эта зависимость выражается уравнением

$$\frac{L(T)}{L[T(\mathrm{Au})]} = \frac{T}{T(\mathrm{Au})}, \qquad (18)$$

где $L(T)$ и $L[T(\mathrm{Au})]$ — спектральная плотность энергии излучения черного тела в диапазоне микроволнового радиоизлучения при температуре T и в точке затвердевания золота T (Au).

Для построения температурной шкалы по микроволновому излучению используют тепловое излучение с длинами волн более 1 мм.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

ЗАВИСИМОСТЬ МЕЖДУ ДАВЛЕНИЕМ p НАСЫЩЕННЫХ ПАРОВ ИЗОТОПА ГЕЛИЯ-4 И ТЕМПЕРАТУРОЙ T В КЕЛЬВИНАХ

Таблица рассчитана для ускорения свободного падения, равного 9,80665 м/с².

p		T	p		T
мм рт. ст.	Па		мм рт. ст.	Па	
2	266,6	1,3863	36	4800,0	2,1524
3	400,0	1,4652	37	4933,0	2,1634
4	533,3	1,5221	38	5066,0	2,1741
5	666,6	1,5707	39	5200,0	2,1848
6	799,9	1,6123	40	5333,0	2,1952
7	933,3	1,6490	41	5466,0	2,2055
8	1066,6	1,6820	42	5600,0	2,2156
9	1199,9	1,7120	43	5733,0	2,2255
10	1333,2	1,7396	44	5866,0	2,2353
11	1466,5	1,7653	45	6000,0	2,2450
12	1599,9	1,7893	46	6133,0	2,5444
13	1733,2	1,8119	47	6266,0	2,2638
14	1866,5	1,8333	48	6399,0	2,2730
15	1999,8	1,8536	49	6533,0	2,2821
16	2133,2	1,8729	50	6666,0	2,2911
17	2266,0	1,8914	60	7999,0	2,3745
18	2400,0	1,9092	70	9333,0	2,4489
19	2533,0	1,9262	80	10666,0	2,5163
20	2666,0	1,9427	90	11999,0	2,5781
21	2800,0	1,9586	100	13332,0	2,6354
22	2933,0	1,9740	110	14665,0	2,6888
23	3066,0	1,9889	120	15999,0	2,7390
24	3200,0	2,0033	130	17332,0	2,7865
25	3333,0	2,0174	140	18665,0	2,8315
26	3466,0	2,0311	150	19998,0	2,8744
27	3600,0	2,0444	160	21332,0	2,9153
28	3733,0	2,0575	170	22665,0	2,9546
29	3866,0	2,0702	180	23998,0	2,9924
30	4000,0	2,0827	190	25331,0	3,0287
31	4133,0	2,0949	200	26664,0	3,0637
32	4266,0	2,1068	210	27998,0	3,0976
33	4400,0	2,1185	220	29331,0	3,1304
34	4533,0	2,1300	230	30664,0	3,1622
35	4666,0	2,1413	240	31997,0	3,1931

Продолжение

p		T	p		T
мм рт. ст.	Па		мм рт. ст.	Па	
250	33331,0	3,2231	530	70661,0	3,8533
260	34664,0	3,2524	540	71994,0	3,8711
270	35997,0	3,2808	550	73327,0	3,8886
280	37330,0	3,3086	560	74661,0	3,9059
290	38663,0	3,3357	570	74994,0	3,9230
300	39997,0	3,3622	580	77327,0	3,9399
310	41330,0	3,3880	590	78660,0	3,9566
320	42663,0	3,4134	600	79993,0	3,9731
330	43996,0	3,4382	610	81327,0	3,9894
340	45330,0	3,4625	620	82660,0	4,0056
350	46663,0	3,4863	630	83993,0	4,0215
360	47996,0	3,5097	640	85326,0	4,0373
370	49329,0	3,5326	650	86660,0	4,0530
380	50663,0	3,5551	660	87993,0	4,0684
390	51996,0	3,5772	670	89326,0	4,0837
400	53329,0	3,5990	680	90659,0	4,0989
410	54662,0	3,6204	690	91992,0	4,1139
420	55995,0	3,6414	700	93726,0	4,1287
430	57329,0	3,6621	710	94659,0	4,1435
440	58662,0	3,6825	720	95992,0	4,1580
450	59995,0	3,7026	730	97325,0	4,1725
460	61328,0	3,7224	740	98659,0	4,1868
470	62662,0	3,7419	750	99992,0	4,2009
480	63995,0	3,7611	760	101325,0	4,2150
490	65328,0	3,7800	770	102658,0	4,2289
500	66661,0	3,7987	780	103991,0	4,2427
510	67994,0	3,8172	790	105325,0	4,2564
520	69328,0	3,8354			

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

ОСНОВНЫЕ РЕПЕРНЫЕ (ПОСТОЯННЫЕ) ТОЧКИ МПТШ—68
Значения температур даны для состояния равновесия при давлении *p*, равном 101,325 кПа (760 мм рт. ст.), за исключением тройных точек и точки 17,042 К

Состояние фазового равновесия	Значение температуры, К (°С)
Равновесие между твердой, жидкой и парообразной фазами равновесного водорода (тройная точка равновесного водорода)	13,81 (—259,34)
Равновесие между жидкой и парообразной фазами равновесного водорода при давлении 33,330 кПа (250 мм рт. ст.).	17,042 (—256,108)
Равновесие между жидкой и парообразной фазами равновесного водорода (точка кипения равновесного водорода)	20,28 (—252,87)
Равновесие между жидкой и парообразной фазами неона (точка кипения неона)	27,102 (—246,048)
Равновесие между твердой, жидкой и парообразной фазами кислорода (тройная точка кислорода)	54,361 (—218,789)
Равновесие между жидкой и парообразной фазами кислорода (точка кипения кислорода)	90,188 (—182,962)
Равновесие между твердой, жидкой и парообразной фазами воды (тройная точка воды)	273,16 (0,01)
Равновесие между жидкой и парообразной фазами воды (точка кипения воды)	373,15 (100)
Равновесие между твердой и жидкой фазами цинка (точка затвердевания цинка)	692,73 (419,58)
Равновесие между твердой и жидкой фазами серебра (точка затвердевания серебра)	1235,08 (961,93)
Равновесие между твердой и жидкой фазами золота (точка затвердевания золота)	1337,58 (1064,43)

Примечание. Состояние равновесия между твердой и жидкой фазами олова (точка затвердевания олова) имеет значение t=231,9681°С и может быть использовано вместо точки кипения воды.

ПРИЛОЖЕНИЕ 3

СТАНДАРТНАЯ ФУНКЦИЯ $W_{ст}$ (T) ДЛЯ ПЛАТИНОВЫХ ТЕРМОМЕТРОВ СОПРОТИВЛЕНИЯ В ОБЛАСТИ ТЕМПЕРАТУР от 13,81 до 273,15К

$$T=\{A_0+\sum_{i=1}^{20} A_i[\ln W_{ст}(T)]^i\}K.$$

Значения коэффициентов A_i

i	A_i	i	A_i
0	$0{,}27315\cdot10^{3}$	11	$0{,}7679763581708458\cdot10$
1	$0{,}2508462096788033\cdot10^{3}$	12	$0{,}2136894593828500\cdot10$
2	$0{,}1350998699649997\cdot10^{3}$	13	0,4598433489280693
3	$0{,}5278567590085172\cdot10^{2}$	14	$0{,}7636146292316480\cdot10^{-1}$
4	$0{,}2767685488541052\cdot10^{2}$	15	$0{,}9693286203731213\cdot10^{-2}$
5	$0{,}3910532053766837\cdot10^{2}$	16	$0{,}9230691540070075\cdot10^{-3}$
6	$0{,}6556132305780693\cdot10^{2}$	17	$0{,}6381165909526538\cdot10^{-4}$
7	$0{,}8080358685598667\cdot10^{2}$	18	$0{,}3022932378746192\cdot10^{-5}$
8	$0{,}7052421182340520\cdot10^{2}$	19	$0{,}8775513913037602\cdot10^{-7}$
9	$0{,}4478475896389657\cdot10^{2}$	20	$0{,}1177026131254774\cdot10^{-8}$
10	$0{,}2125256535560578\cdot10^{2}$		

Стандартная функция $W_{ст}$ при $T=273{,}15$К переходит в функцию $W(T)$, заданную уравнениями (11) и (12) для $a=3{,}9259668\cdot10^{-3}$ °С$^{-1}$ и $\delta=1{,}496334$°С таким образом, что при этой температуре совпадают значения функций, а также их первых и вторых производных.

ПРИЛОЖЕНИЕ 4

ТАБЛИЦА ЗНАЧЕНИЙ $W_{ст}(T)$

T	$W_{ст}(T)$	T	$W_{ст}(T)$	T	$W_{ст}(T)$
13	0,00123061	56	0,09842336	99	0,28197988
14	0,00145973	57	0,10240774	100	0,28630201
15	0,00174541	58	0,10642583	101	0,29062154
16	0,00209474	59	0,11047506	102	0,29493841
17	0,00251512	60	0,11455312	103	0,29925245
18	0,00301428	61	0,11855789	104	0,30356359
19	0,00359962	62	0,12278722	105	0,30787183
20	0,00427780	63	0,12693914	106	0,31217710
21	0,00505495	64	0,13111189	107	0,31647939
22	0,00593668	65	0,13530363	108	0,32077856
23	0,00692804	66	0,13951284	109	0,32507467
24	0,00803316	67	0,14373800	110	0,32936765
25	0,00925504	68	0,14797773	111	0,33365751
26	0,01059585	69	0,15223058	112	0,33794416
27	0,01205690	70	0,15649541	113	0,34222768
28	0,01363901	71	0,16077108	114	0,34650800
29	0,01534261	72	0,16505643	115	0,35078519
30	0,01716768	73	0,16935049	116	0,35505910
31	0,01911363	74	0,17365240	117	0,35932989
32	0,02117944	75	0,17796117	118	0,36359754
33	0,02336343	76	0,18227605	119	0,36786199
34	0,02566335	77	0,18659628	120	0,37212331
35	0,02807645	78	0,19092107	121	0,37638151
36	0,03059953	79	0,19524992	122	0,38063657
37	0,03322916	80	0,19958212	123	0,38488851
38	0,03596155	81	0,20391714	124	0,38913732
39	0,03879305	82	0,20825445	125	0,39338316
40	0,04171968	83	0,21259344	126	0,39762594
41	0,04473760	84	0,21693388	127	0,40186567
42	0,04784292	85	0,22127523	128	0,40610242
43	0,05103178	86	0,22561712	129	0,41033628
44	0,05430036	87	0,22995916	130	0,41456709
45	0,05764486	88	0,23430105	131	0,41879507
46	0,06106161	89	0,23864248	132	0,42302015
47	0,06454679	90	0,24298315	133	0,42724233
48	0,06809690	91	0,24732290	134	0,43146169
49	0,07170835	92	0,25166128	135	0,43567831
50	0,07537756	93	0,25599836	136	0,43989210
51	0,07910123	94	0,26033369	137	0,44410322
52	0,08287595	95	0,26466718	138	0,44831159
53	0,08669859	96	0,26899870	139	0,45251730
54	0,09056600	97	0,27332807	140	0,45672033
55	0,09447515	98	0,27765516	141	0,46092077

Продолжение

T	$W_{ст}(T)$	T	$W_{ст}(T)$	T	$W_{ст}(T)$
142	0,46511861	186	0,64763807	230	0,82682531
143	0,46931387	187	0,65174352	231	0,83086561
144	0,47350660	188	0,65584730	232	0,83490461
145	0,47769682	189	0,65994947	233	0,83894224
146	0,48188459	190	0,66404996	234	0,84297857
147	0,48606985	191	0,66814886	235	0,84701353
148	0,49025274	192	0,67224607	236	0,85104726
149	0,49443319	193	0,67634176	237	0,85507963
150	0,49861135	194	0,68043577	238	0,85911069
151	0,50278707	195	0,68452825	239	0,86314046
152	0,50696058	196	0,68861913	240	0,86716894
153	0,51113172	197	0,69270841	241	0,87119611
154	0,51530065	198	0,69679617	242	0,87522199
155	0,51946737	199	0,70088232	243	0,87924657
156	0,52363180	200	0,70496694	244	0,88326994
157	0,52779409	201	0,70905004	245	0,88729200
158	0,53195417	202	0,71313161	246	0,89131269
159	0,53611211	203	0,71721174	247	0,89533224
160	0,54026792	204	0,72129026	248	0,89935049
161	0,54442167	205	0,72536733	249	0,90336744
162	0,54857336	206	0,72944288	250	0,90738309
163	0,55272291	207	0,73351690	251	0,91139753
164	0,55687048	208	0,73758947	252	0,91541074
165	0,56101606	209	0,74166059	253	0,91942274
166	0,56515958	210	0,74573026	254	0,92343343
167	0,56930112	211	0,74979841	255	0,92744283
168	0,57344076	212	0,75386518	256	0,93145101
169	0,57757848	213	0,75793043	257	0,43545805
170	0,58171423	214	0,76199430	258	0,93946371
171	0,58584806	215	0,76605672	259	0,94346822
172	0,58997999	216	0,77011770	260	0,94747152
173	0,59411008	217	0,77417730	261	0,95147352
174	0,59823835	218	0,77823545	262	0,95547430
175	0,60236478	219	0,78229223	263	0,95947385
176	0,60648931	220	0,78634756	264	0,96347219
177	0,61061208	221	0,79040151	265	0,96746931
178	0,61473310	222	0,79445409	266	0,97146513
179	0,61885229	223	0,79850523	267	0,97545980
180	0,62296972	224	0,80255506	268	0,97945325
181	0,62708540	225	0,80660352	269	0,98344641
182	0,63119939	226	0,81065054	270	0,98743642
183	0,63531164	227	0,81469625	271	0,99142614
184	0,63942213	228	0,81874059	272	0,99541471
185	0,64353094	229	0,82278364	273	0,99940199

ПРИЛОЖЕНИЕ 5

ТАБЛИЦА ЗНАЧЕНИЙ $W_{ст}(T)$ ДЛЯ ТЕМПЕРАТУР РЕПЕРНЫХ (ПОСТОЯННЫХ) ТОЧЕК

Реперная (постоянная) точка	T	$W_{ст}$
Тройная точка равновесного водорода	13,81	0,00141206
Точка 17,042К равновесного водорода	17,042	0,00253444
Точка кипения равновесного водорода	20,28	0,00448517
Точка кипения неона	27,102	0,01221272
Тройная точка кислорода	54,361	0,09197252
Точка кипения кислорода	90,188	0,24379909
Точка кипения воды	373,15	1,39259668

ПРИЛОЖЕНИЕ 6

ТЕМПЕРАТУРНЫЕ ЗАВИСИМОСТИ ДАВЛЕНИЯ НАСЫЩЕННЫХ ПАРОВ РАВНОВЕСНОГО ВОДОРОДА, НЕОНА, КИСЛОРОДА И ВОДЫ

$p_0 = 101{,}325$ кПа (760 мм рт. ст.)

Равновесие между жидкой и парообразной фазами	Температурный диапазон применения, К	Формула
Равновесного водорода	13,81—23,0	$\lg\frac{p}{p_0} = A + B/T + CT + DT^2$, где $A = 1{,}711466$ $B = -44{,}01046$ К $C = 0{,}0235909$ $К^{-1}$ $D = -0{,}000048017$ $К^{-2}$
Неона	27,0—27,2	$T = 27{,}102 + 3{,}3144\left(\frac{p}{p_0} - 1\right) - 1{,}24\left(\frac{p}{p_0} - 1\right)^2 + 0{,}74\left(\frac{p}{p_0} - 1\right)^3$
Кислорода	90,1—90,3	$T = 90{,}188 + 9{,}5648\left(\frac{p}{p_0} - 1\right) - 3{,}69\left(\frac{p}{p_0} - 1\right)^2 + 2{,}22\left(\frac{p}{p_0} - 1\right)^3$
Воды	373,05—373,25	$T = 373{,}15 + 28{,}0216\left(\frac{p}{p_0} - 1\right) - 11{,}642\left(\frac{p}{p_0} - 1\right)^2 + 7{,}1\left(\frac{p}{p_0} - 1\right)^3$

ПРИЛОЖЕНИЕ 7
Справочное

СРЕДСТВА ДЛЯ ОСУЩЕСТВЛЕНИЯ МПТШ—68

Измерение температур по МПТШ—68 с высокой точностью должно выполняться с соблюдением требований, изложенных в настоящем приложении. Описанные ниже правила и рекомендации по осуществлению температурной шкалы соответствуют практике ведущих термометрических лабораторий. Приложение содержит описание приборов и методов, применение которых обеспечивает измерения температур на эталонном уровне точности.

1. Эталонный термометр сопротивления

Эталонный платиновый термометр сопротивления должен быть сконструирован и изготовлен таким образом, чтобы четырехпроводный чувствительный элемент был как можно свободнее от натяжений и оставался таким во время работы. Чувствительные элементы эталонных термометров изготовляют из платиновой проволоки постоянного диаметра от 0,05 до 0,5 мм, причем короткий участок каждого вывода, примыкающего к спирали, делают из платины.

Значение R (0°С) термометра обычно составляет 25 Ом, а сила измерительного тока такого термометра обычно равна 1 или 2 мА. Детали термометра, находящиеся в непосредственной близости к чувствительному элементу, изготовляют из чистых материалов, не реагирующих с платиной.

Во время изготовления термометра рекомендуется, чтобы его гильза была вакуумирована при нагреве примерно до 450°С, затем заполнена сухим газом и герметически запаяна. Желательно, чтобы в газе, заполняющем термометр, присутствовал кислород: он создаст для остатков примесей в платине окислительную среду. По окончании изготовления чувствительный элемент следует стабилизировать нагреванием при температуре, превышающей максимальную, на которую он рассчитан, и во всяком случае не ниже 450°С.

Сопротивление изоляции каркаса и крепежных деталей должно быть достаточно высоким во избежание значительного шунтирования сопротивления термометра. Например, должны быть приняты меры предосторожности, чтобы избежать конденсации водяных паров в пространстве между выводами при работе термометра в условиях низких температур, а также чтобы избежать возможных утечек в самих изоляционных материалах, используемых в термометре при высоких температурах.

В качестве изоляционных материалов применяют слюду, кварц и окись алюминия, которые обычно обеспечивают необходимую изоляцию вплоть до $t=500$°С. Однако, когда температура приближается к 630°С, условия становятся более трудными и могут легко возникать ошибки порядка 1 мК или больше. В случае применения слюды создается дополнительная трудность, так как, если слюду нагревать до температуры выше 450°С, может образоваться значительное количество воды. Воду необходимо периодически устранять откачкой или осушением, иначе изоляция чувствительного элемента будет быстро ухудшаться.

Чтобы обеспечить необходимую стабильность сопротивления эталонного платинового термометра и температурного коэффициента его сопротивления, чувствительный элемент следует сохранять как можно дольше в отожженном состоянии. Изменение сопротивления термометра может возникнуть как из-за наклепа, вызываемого обычным обращением с термометром, так и из-за быстрого охлаждения, если термометр быстро перенести из среды с температурой выше 500°С в среду комнатной температуры. В последнем случае сопротив-

ление термометра возрастает из-за вызванных мгновенным охлаждением неравновесных концентраций дефектов кристаллической решетки и сохраняется таким до тех пор, пока термометр остается при температуре ниже 200°С. Бо́льшую часть сопротивления, возникающего из-за наклепа, и сопротивление, вызываемое мгновенным охлаждением, можно устранить отжигом при температуре 500°С за 30 мин.

Значительные ошибки могут быть вызваны радиационными потерями из-за полного внутреннего отражения в конструкционных деталях термометра, особенно если они из кварца. Такие потери в гильзе, а не во внутренних деталях, можно предотвратить чернением внутренней поверхности гильзы (например, суспензией коллоидного графита) или обработкой поверхности гильзы песком, что сделает ее матовой.

Глубину погружения термометра, обеспечивающую устранение погрешности из-за теплопередачи, устанавливают испытаниями. Для этого достаточно убедиться в том, что наблюдаемый температурный градиент при воспроизведении точки затвердевания металла соответствует температурному градиенту, ожидаемому в этой точке из-за гидростатического давления в соответствии с табл. 1 настоящего приложения.

Для температур ниже 90К обычно используют короткий платиновый термометр сопротивления диаметром не более 5 мм и длиной не более 60 мм, который может быть целиком погружен в среду с однородной температурой. Теплопередачи по проводам в этом случае избегают, прикрепив их к подходящему охранному кольцу. Чтобы получить хороший тепловой контакт между чувствительным элементом и окружающей средой, этот элемент помещают в тонкостенную (толщина стенки $\sim$0,25 мм) гильзу обычно из платины, наполненную гелием.

Полезным критерием эффективности отжига и стабильности термометра является постоянство его сопротивления при температуре реперной точки. Для этой цели обычно используют тройную точку воды (273,16К) и точку кипения гелия (4,215К). Первая удобна для большинства высокотемпературных термометров, а вторая не только легко реализуется для термометров, встроенных в криогенную аппаратуру, но и имеет дополнительное преимущество — относительно малую чувствительность к изменениям температуры. Практикой установлено, что изменение сопротивления в тройной точке воды не должно превышать $4 \cdot 10^{-6}\ R(0°C)$ (эквивалентно $\sim$1 мК при температуре выше 40К) для серийных высокотемпературных термометров и $5 \cdot 10^{-7} R$ (0°С) для самых лучших термометров при условии крайне осторожного обращения с ними. Для термометров, используемых только при температурах до 100°С или ниже, изменение сопротивления в тройной точке воды не должно превышать $5 \cdot 10^{-7}\ R(0°C)$.

Небольшое повышение температуры термометров, вызванное измерительным током, может быть определено измерениями его сопротивления при двух значениях силы тока.

2. Эталонный термоэлектрический термометр

Термоэлектрические термометры, используемые в качестве эталонных, изготовляют из проволоки постоянного диаметра от 0,35 до 0,65 мм. Электроды термометра должны быть тщательно отожжены, чтобы при его использовании обеспечивалось постоянство электродвижущей силы. Для этой цели необходимо нагреть платиновую проволоку до температуры не менее 1100°С, а платинородиевую проволоку — до 1450°С. Если отжиг проведен до того, как электроды помещены в изолирующую арматуру, то после этой процедуры термометр необходимо снова нагреть до температуры не менее 1100°С и отжигать до тех пор, пока электродвижущая сила не стабилизируется и не будут устранены местные негомогенности, вызванные натяжением. Это можно считать выполненным, если электродвижущая сила термометра не изменяется при изменениях температурных градиентов вдоль электродов. Например, электродвижущая

сила не должна изменяться по мере увеличения глубины погружения термоэлектрического термометра в среду однородной температуры.

3. Давление

Обычно давление определяют по показаниям ртутного манометра. При этом средняя плотность чистой ртути, если ее температура находится в интервале от 0 до 40°С и если столб ртути соответствует давлению p, которое необходимо измерить, выражается с достаточной точностью формулой

$$\rho\left(t, \frac{p}{2}\right) = \frac{\rho(20°C,\ p_0)}{[1+A(t-20°C)+B(t-20°C)^2]\left[1-\chi\left(\frac{p}{2}-p_0\right)\right]}, \qquad (1)$$

где $A = 18115 \cdot 10^{-8}\,°C^{-1}$;

$B = 0{,}8 \cdot 10^{-8}\,°C^{-2}$;

$\chi = 4{,}0 \cdot 10^{-11}\ Па^{-1} = 5{,}3 \cdot 10^{-9}\ \frac{1}{мм\ рт.\ ст.}$;

$\rho(20°C,\ p_0) = 13545{,}87$ кг/м³ — плотность чистой ртути при температуре $t = 20°C$ и при давлении $p_0 = 101{,}325$ кПа (760 мм рт. ст.).

Достаточно точное значение местного ускорения свободного падения может быть получено Потсдамской системой и при введении поправки, равной $-14 \cdot 10^{-5}$ м/с².

Гидростатическое давление, возникающее в ваннах для реализации реперных точек, может вызвать небольшие, но подлежащие учету температурные эффекты; они указаны в табл. 1.

4. Тройная точка воды

Температура тройной точки воды может быть реализована в герметичных стеклянных ампулах, содержащих только воду высокой чистоты с изотопным составом, соответствующим в значительной мере океанской воде. Ампулы имеют осевой колодец для термометров; температура тройной точки воды реализуется в любом месте, где лед находится в равновесии с поверхностью вода — пар. На глубине h ниже поверхности вода — пар температура равновесия t между льдом и жидкой водой выражается формулой

$$t = A + Bh, \qquad (2)$$

где $A = 0{,}01°C$ и $B = -7 \cdot 10^{-4}\,°C/м$.

Метод, рекомендуемый для приготовления тройной точки, состоит в формировании толетого слоя льда вокруг осевого колодца для термометра охлаждением изнутри, а затем в оттаивании достаточного количества этого слоя льда также изнутри, вследствие чего получают новую поверхность раздела вода — лед, примыкающую к колодцу. В течение первых часов, следующих за приготовлением тройной точки воды, температура, измеряемая в осевом колодце, поднимается довольно быстро на несколько десятитысячных кельвина, становясь стабильной по прошествии периода от одного до трех дней. Это первоначальное изменение температуры, вероятно, вызывается ростом ледяных кристаллов или медленным исчезновением натяжения в кристаллах. Тройная точка, приготовленная таким образом и содержащаяся в ледяной ванне, способна сохранять температуру постоянной с отклонением не более 0,1 мК в течение нескольких месяцев. Даже в ампулах с водой из различных источников, если работать с ними указанным способом, расхождения в полученных температурах не должны превышать 0,2 мК. Значительное повышение температуры термометра выше температуры тройной точки воды может быть вызвано искус-

ственным или солнечным светом, падающим на ампулу, в связи с чем рекомендуется проводить измерения в ампулах, достаточно защищенных от излучения.

Различное содержание изотопов в природной воде может вызвать заметные расхождения в значениях температуры тройной точки. Океанская вода содержит около 0,016 моля дейтерия ^{2}H на 100 молей водорода ^{1}H; 0,04 моля ^{17}O и 0,2 моля ^{18}O на 100 молей ^{16}O. Такое содержание тяжелых изотопов по существу самое высокое, которое может встречаться в природной воде. Континентальные поверхности воды обычно содержат около 0,015 моля ^{2}H на 100 молей ^{1}H; вода, поступающая от полярных снегов, может иногда содержать всего лишь 0,01 моля ^{2}H на 100 молей ^{1}H.

Операция по очистке воды может слегка изменить ее изотопный состав, а изотопный состав поверхности раздела вода — лед несколько зависит от технологии охлаждения воды. Изменение изотопного состава воды, обусловленное увеличением содержания дейтерия ^{2}H на 0,001 моля (при расчете на 100 молей ^{1}H), соответствует повышению температуры тройной точки воды на 0,040 мК. Таковым и является расхождение между температурами тройных точек океанской и обычной континентальной поверхностной воды. Максимальное расхождение в температурах тройных точек природной массы составляет 0,250 мК.

5. Тройная точка, точка 17,042К и точка кипения равновесного водорода

Водород имеет две молекулярные модификации (обозначается приставками «орто» и «пара»); их наличие объясняется различными относительными ориентациями двух ядерных спинов в двуатомных молекулах. Равновесная орто—пара концентрация зависит от температуры и при комнатной температуре соответствует примерно 75% ортоводорода и 25% пароводорода (так называемый нормальный водород). После ожижения это соотношение медленно меняется со временем; соответствующие изменения происходят и в физических свойствах водорода. В точке кипения равновесная концентрация соответствует 0,21% орто- и 99,79% пароводорода. Температура кипения водорода этого состава («равновесного») ниже температуры кипения нормального водорода примерно на 0,12 К. (Название «равновесный водород» означает, что водород имеет свою равновесную орто—пара концентрацию при данной температуре). Чтобы избежать ошибок при реализации реперных точек водорода, вызываемых неопределенным орто—пара составом, рекомендуется использовать равновесный водород, конвертированный катализатором, например, гидроокисью железа. При этом следует использовать водород высокой химической чистоты, которая достигается диффундированием его через палладий.

Температура равновесия между твердой, жидкой и газообразной фазами водорода может быть реализована использованием достаточного количества жидкого водорода в присутствии какого-либо катализатора в полости медного блока, в который вмонтированы платиновые термометры сопротивления и который находится в вакууме. Температуру блока понижают до тех пор, пока водород не затвердеет. Затем температуру медленно повышают и наблюдают переход в тройной точке. Горизонтальный участок кривой «время—температура» может быть постоянным до 0,1 мК в течение 30 мин или более.

Температуру равновесия между жидким и газообразным водородом обычно реализуют статическим методом. В соответствии с этим методом в блоке из металла, обладающего высокой теплопроводностью, имеется полость, в которой создается и поддерживается температура, близкая к точке кипения (погружением блока в жидкий водород). Чтобы избежать температурных градиентов из-за гидростатического давления, с жидким водородом соприкасается верхняя плоскость блока, а нижняя часть блока защищена вакуумной рубашкой. Полость в блоке содержит небольшое количество очень чистого жидкого водорода при наличии какого-нибудь катализатора. Давление паров водорода, на-

ходящегося в полости, передается по капилляру (из материала с низкой теплопроводностью) к манометру, находящемуся вне криогенной части установки.

Следует принять меры предосторожности, чтобы избежать прямого излучения по капилляру в полость и чтобы на всем своем протяжении от полости до манометра капилляр имел более высокую температуру, чем температура на поверхности жидкого водорода в полости.

Измерения заключаются в сравнении показаний конденсационного термометра, сконструированного указанным образом, и платиновых термометров сопротивления, смонтированных в плотно пригнанных гнездах, высверленных в металлическом блоке и расположенных как можно ближе к полости.

Правильность измерений можно проверить, показав, что полученные значения не зависят от отношения объема жидкого водорода к объему пара в полости.

6. Точка кипения неона

Точка кипения неона может быть реализована способом, подобным описанному для водорода. Нормальный изотопный состав неона: 0,0026 моля ^{21}Ne и 0,088 моля ^{22}Ne на 0,909 моля ^{20}Ne.

7. Тройная точка и точка кипения кислорода

Тройная точка и точка кипения кислорода могут быть реализованы способом, подобным описанному для водорода. Особенно следует позаботиться о чистоте кислорода в конденсационном термометре. Кислород является достаточно чистым, когда нормальная точка кипения остается постоянной при неоднократной откачке его паров.

8. Точка кипения воды

Температуру равновесия между жидкой водой и ее паром обычно реализуют динамическим методом: термометр погружают в насыщенные пары воды. Для эталонных работ рекомендуется использовать закрытые системы, в которых кипятильник и манометр соединены с маностатом, наполненным воздухом или, предпочтительнее, гелием.

Кипятильник должен быть сконструирован так, чтобы избежать загрязнений воды. Термометр необходимо защитить от излучений тех деталей аппаратуры, температура которых отлична от точки кипения. Если температура равновесия достигнута, то, после приведения результатов измерения к постоянному давлению, полученное значение температуры не будет зависеть от продолжительности измерений скорости подачи тепла в кипятильник и глубины погружения термометра.

Изменение содержания дейтерия в воде вызывает изменение температуры кипения воды в том же направлении, что и для тройной точки воды, но примерно в три раза меньше.

9. Точка затвердевания олова и цинка

Температуры затвердевания могут быть реализованы с очень высокой воспроизводимостью наблюдением за горизонтальной частью кривой «температура — время», характеризующей медленное затвердевание очень чистых металлов.

Для плавления и затвердевания олова и цинка можно использовать тигель из очень чистого искусственного графита (99,999% по массовой доле) диаметром около 5 см, с осевым колодцем для термометра. Глубина погружения термометра в металл должна быть достаточной для устранения влияния теплопередачи по проводам термометра на температуру его чувствительного элемента.

Удобно держать тигель с металлом в пирексовой или кварцевой пробирке в инертной атмосфере и нагревать его в печи с металлическим блоком.

Процедура охлаждения металла при определении точки затвердевания должна быть такой, чтобы чувствительный элемент термометра имел возможно лучший тепловой контакт с поверхностью раздела твердой и жидкой фаз металла и находился с ней в тепловом равновесии. Вскоре после начала кристаллизации должна появиться или твердая оболочка, оформившаяся на стенках тигля, или твердая корка вокруг колодца для термометра.

Температура равновесия между твердым и жидким металлом слегка изменяется в зависимости от давления в соответствии в табл. 1 настоящего приложения.

Олово высокой чистоты (составляющей 99,9999% по массовой доле) при охлаждении из жидкого состояния переохлаждается на 20—30К перед затвердеванием. Точка затвердевания олова может быть успешно реализована по следующей методике (при этом удается избежать избыточного переохлаждения печи). Начиная с того момента, когда температура превысила температуру точки затвердевания на несколько кельвинов, печь медленно охлаждают со скоростью примерно 0,1 К/мин до тех пор, пока расплавленный металл не достигнет температуры плавления. Затем пробирку с тиглем, содержащим расплав, и контрольный термометр сопротивления либо перемещают к верхнему краю печи, либо полностью удаляют из печи. В обоих случаях образец быстро охлаждается. При обнаружении быстрого понижения температуры, что указывает на кристаллизацию, пробирку с тиглем тут же погружают в печь, которая все еще медленно охлаждается. В течение медленно протекающего процесса затвердевания реализуется характерная кривая охлаждения для металла высокой чистоты, имеющая температурную площадку. Воспроизводимость этого плоского участка для конкретного образца не хуже $\pm 0{,}1$ мК за определенное время, зависящее от скорости охлаждения печи.

Способ реализации точки затвердевания цинка высокой чистоты (99,9999% по массовой доле) несколько отличен от описанного, поскольку цинк переохлаждается незначительно. Тонкий слой твердого металла образуется в центральном колодце для термометра, если удалить термометр. Когда расплавленный металл достигнет температуры плавления, охладить его до комнатной температуры и вставить на место или предварительно вставить на его место кварцевый стержень приблизительно на 30 с перед тем как вернуть термометр обратно.

Критерием достаточной чистоты образца цинка или олова является то, что значение температуры, соответствующее плоскому участку кривой плавления, меняется не более, чем на 1 мК.

10. Точки затвердевания серебра и золота

Температуру равновесия между жидкой и твердой фазами серебра и золота реализуют в закрытых тиглях либо из очень чистого искусственного графита, либо из плавленного кварца. Если тигель графитовый, рекомендуется предотвратить доступ воздуха к нему во избежание окисления графита.

Расплавленное серебро должно быть защищено, чтобы не допустить растворения в нем кислорода, вызывающего понижение точки затвердевания.

Слиток металла необходимо нагреть до однородной температуры, на несколько кельвинов превышающей температуру точки плавления металла, и затем медленно охладить.

Термоэлектрический термометр, подлежащий эталонированию, помещенный в защитную трубку из подходящего огнеупорного материала, с огнеупорными изоляторами, разделяющими оба электрода, погружают в расплавленный металл, которому затем дают остыть. Глубина погружения термоэлектрического термометра в металл должна быть достаточной, чтобы исключить теплопередачу по электродам.

Достигнута ли температура равновесия, можно проверить по следующим признакам: электродвижущая сила термоэлектрического термометра не должна зависеть от небольших изменений глубины погружения в расплавленный металл во время последовательных охлаждений и должна оставаться постоянной не менее 5 мин во время одного охлаждения.

Чтобы использовать точку затвердевания золота в качестве реперной для области шкалы, определяемой в соответствии с законами излучения, необходимо иметь черное тело. Для его реализации тигель, содержащий золото, должен быть изменен таким образом, чтобы обеспечить погружение излучателя, имеющего однородную температуру, в золото. Черное тело легче осуществить, если излучатель изготовлен из материала, обладающего высокой излучательной способностью. Для этой цели очень подходит графит.

11. Вторичные реперные (постоянные) точки

Наряду с основными реперными точками МПТШ—68 имеются и другие реперные точки. Некоторые из них и их температуры по МПТШ—68 указаны в табл. 2 настоящего приложения. За исключением температур тройных точек и температур, вычисляемых по уравнениям, определяющим зависимость давления паров от температуры, остальные являются температурами равновесия системы при давлении, равном 101,325 кПа (760 мм рт. ст.).

Таблица 1

Температура точек затвердевания металлов в зависимости от давления

Металл	Точка затвердевания, °С, при давлении 101,325 кПа (760 мм рт. ст.)	Коэффициент давления	
		К/мм рт. ст.	К/см жидкости
Ртуть	—38,862	+0,0000071	+0,000071
Индий	156,634	+0,0000064	+0,000033
Олово	231,9681	+0,0000043	+0,000022
Висмут	271,442	—0,0000046	—0,000034
Кадмий	321,108	+0,0000082	+0,000048
Свинец	327,502	+0,0000105	+0,000082
Цинк	419,58	+0,0000057	+0,000027
Сурьма	630,74	+0,0000001	+0,000005

Примечание. 1 К/мм рт. ст.$=7{,}5\cdot10^{-3}$ К/Па.

Таблица 2

Вторичные реперные (постоянные) точки

Состояние фазового равновесия	Температура, К (°С)
Равновесие между твердой, жидкой и парообразной фазами нормального водорода (тройная точка нормального водорода)	13,956 (—259,194)
Равновесие между жидкой и парообразной фазами нормального водорода (точка кипения нормального водорода) $\lg\frac{p}{p_0}=A+\frac{B}{T}+CT+DT^2,$ где $A=1{,}734791$; $B=-44{,}62368$ К; $C=0{,}0231869$ $К^{-1}$; $D=-0{,}000048017$ $К^{-2}$ для интервала температур от 13,956 до 30 К	20,397 (—252,753)
Равновесие между твердой, жидкой и парообразной фазами неона (тройная точка неона)	24,555 (—248,595)
Равновесие между жидкой и парообразной фазами неона $\lg\frac{p}{p_0}=A+\frac{B}{T}+CT+DT^2,$ где $A=4{,}61152$; $B=-106{,}3851$ К; $C=-0{,}0368331$ $К^{-1}$; $D=4{,}24892\cdot10^{-4}К^{-2}$ для интервала температур от 24,555 до 40 К	27,102 (—246,048)
Равновесие между твердой, жидкой и парообразной фазами азота (тройная точка азота)	63,148 (—210,002)
Равновесие между жидкой и парообразной фазами азота (точка кипения азота) $\lg\frac{p}{p_0}=A+\frac{B}{T}+C\lg\frac{T}{T_0}+DT+ET^2,$ где $A=5{,}893139$; $B=-404{,}13105$ К; $C=-2{,}3749$ $D=-0{,}0142505$ $К^{-1}$; $E=72{,}5342\cdot10^{-6}$ $К^{-2}$ для интервала температур от 63,148 до 84 К	77,348 (—195,802)

Продолжение

Состояние фазового равновесия	Температура, К (°С)
Равновесие между жидкой и парообразной фазами кислорода $\lg\frac{p}{p_0}=A+\frac{B}{T}+C\lg\frac{T}{T_0}+DT+ET^2,$ где $A=5{,}961546$; $B=-467{,}45576$ К; $C=-1{,}664512$; $D=-0{,}01321301$ $К^{-1}$; $E=-50{,}8041\cdot10^{-6}$ $К^{-2}$ для интервала температур от 54,361 до 94К	90,188 (—182,962)
Равновесие между твердой и парообразной фазами двуокиси углерода (точка возгонки двуокиси углерода) $T=\left[194{,}674+12{,}264\left(\frac{p}{p_0}-1\right)-9{,}15\left(\frac{p}{p_0}-1\right)^2\right]$ для интервала температур от 194 до 195К	194,674 (—78,476)
Равновесие между твердой и жидкой фазами ртути (точка затвердевания ртути)	234,288 (—38,862)
Равновесие между льдом и насыщенной воздухом водой (точка таяния льда)	273,15 (0)
Равновесие между твердой, жидкой и парообразной фазами феноксибензола (дифенилового эфира) (тройная точка феноксибензола)	300,02 (26,87)
Равновесие между твердой, жидкой и парообразной фазами бензойной кислоты (тройная точка бензойной кислоты)	395,52 (122,37)
Равновесие между твердой и жидкой фазами индия (точка затвердевания индия)	429,784 (156,634)
Равновесие между твердой и жидкой фазами висмута (точка затвердевания висмута)	544,592 (271,422)
Равновесие между твердой и жидкой фазами кадмия (точка затвердевания кадмия)	594,258 (321,108)

Продолжение

Состояние фазового равновесия	Температура, К (°С)
Равновесие между твердой и жидкой фазами свинца (точка затвердевания свинца)	600,652 (327,502)
Равновесие между жидкой и парообразной фазами ртути (точка кипения ртути) $t=\left[356{,}66+55{,}552\left(\frac{p}{p_0}-1\right)-\right.$ $\left.-23{,}03\left(\frac{p}{p_0}-1\right)^2+14{,}0\left(\frac{p}{p_0}-1\right)^3\right]$ для p от $90\cdot10^3$ до $104\cdot10^3$ Па	629,81 (356.66)
Равновесие между жидкой и парообразной фазами серы (точка кипения серы) $t=\left[444{,}674+66{,}010\left(\frac{p}{p_0}-1\right)-\right.$ $\left.-27{,}48\left(\frac{p}{p_0}-1\right)^2+19{,}14\left(\frac{p}{p_0}-1\right)^3\right]$ для p от $90\cdot10^3$ до $104\cdot10^3$ Па	717,824 (444,674)
Равновесие между твердой и жидкой фазами медь-алюминиевой эвтектики	821,38 (548,23)
Равновесие между твердой и жидкой фазами сурьмы (точка затвердевания сурьмы)	903,89 (630,74)
Равновесие между твердой и жидкой фазами алюминия (точка затвердевания алюминия)	933,52 (660,37)
Равновесие между твердой и жидкой фазами меди (точка затвердевания меди)	1357,6 (1084,5)
Равновесие между твердой и жидкой фазами никеля (точка затвердевания никеля)	1728 (1455)
Равновесие между твердой и жидкой фазами кобальта (точка затвердевания кобальта)	1767 (1494)
Равновесие между твердой и жидкой фазами палладия (точка затвердевания палладия)	1827 (1554)
Равновесие между твердой и жидкой фазами платины (точка затвердевания платины)	2045 (1772)
Равновесие между твердой и жидкой фазами родия (точка затвердевания родия)	2236 (1963)
Равновесие между твердой и жидкой фазами иридия (точка затвердевания иридия)	2720 (2447)
Равновесие между твердой и жидкой фазами вольфрама (температура плавления вольфрама)	3660 (3387)

ПРИЛОЖЕНИЕ 8
Справочное

ОРИЕНТИРОВОЧНЫЕ ЗНАЧЕНИЯ РАСХОЖДЕНИЙ (t_{68}—t_{48}) В КЕЛЬВИНАХ МЕЖДУ ЗНАЧЕНИЕМ ТЕМПЕРАТУРЫ ПО МПТШ—68 И МПТШ—48

t_{68}, °С	0	—10	—20	—30	—40	—50	—60	—70	—80	—90	—100
—100	0,022	0,013	0,003	—0,006	—0,013	—0,013	—0,005	0,007	0,012		
0	0,000	0,006	0,012	0,018	0,024	0,029	0,032	0,034	0,033	0,029	0,022

t_{68}, °С	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
0	0,000	—0,004	—0,007	—0,009	—0,010	—0,010	—0,010	—0,008	—0,006	—0,003	0,000
100	0,000	0,004	0,007	0,012	0,016	0,020	0,025	0,029	0,034	0,038	0,043
200	0,043	0,047	0,051	0,054	0,058	0,061	0,064	0,067	0,069	0,071	0,073
300	0,073	0,074	0,075	0,076	0,077	0,077	0,077	0,077	0,077	0,076	0,076
400	0,076	0,075	0,075	0,075	0,074	0,074	0,074	0,075	0,076	0,077	0,079
500	0,079	0,082	0,085	0,089	0,094	0,100	0,108	0,116	0,126	0,137	0,150
600	0,150	0,165	0,182	0,200	0,23	0,25	0,28	0,31	0,34	0,36	0,39
700	0,39	0,42	0,45	0,47	0,50	0,53	0,56	0,58	0,61	0,64	0,67
800	0,67	0,70	0,72	0,75	0,78	0,81	0,84	0,87	0,89	0,92	0,95
900	0,95	0,98	1,01	1,04	1,07	1,10	1,12	1,15	1,18	1,21	1,24
1000	1,24	1,27	1,30	1,33	1,36	1,39	1,42	1,44			

t_{68}, °С	0	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
1000	—	1,5	1,7	1,8	2,0	2,2	2,4	2,6	2,8	3,0	3,2
2000	3,2	3,5	3,7	4,0	4,2	4,5	4,8	5,0	5,3	5,6	5,9
3000	5,9	6,2	6,5	6,9	7,2	7,5	7,9	8,2	8,6	9,0	9,3

Редактор *А. С. Ляпин*
Технический редактор *Э. В. Митяй*
Корректор *Л. В. Сницарчук*

Сдано в наб. 04.03.86 Подп. в печ. 11.04.86 1,75 усл. п. л. 1,75 усл. кр.-отт. 1,76 уч.-изд. л.
Тираж 6000 Цена 10 коп.

Ордена «Знак Почета» Издательство стандартов, 123840, Москва, ГСП,
Новопресненский пер., д. 3.
Вильнюсская типография Издательства стандартов, ул. Миндауго, 12/14. Зак. 2132.

gost.e-ecolog.ru