

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Сибирский государственный университет геосистем и технологий»  
(СГУГиТ)

Н. А. Вихарева, А. Ф. Бродников, Н. Н. Достовалов

# **МЕТРОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ ОСНОВЫ ТЕРМОМЕТРИИ**

Утверждено редакционно-издательским советом университета  
в качестве учебного пособия для обучающихся по направлению подготовки  
27.03.01 Стандартизация и метрология (уровень бакалавриата)

Новосибирск  
СГУГиТ  
2020

УДК 006  
В549

Рецензенты: кандидат технических наук, ведущий инженер по метрологии  
АО «НМЗ» Искра» *О. В. Бояркеева*  
кандидат технических наук, доцент СГУГиТ *А. В. Троеглазова*

**Вихарева, Н. А.**

В549 Метрологическое обеспечение теплотехнических измерений. Основы термометрии [Текст] : учеб. пособие / Н. А. Вихарева, А. Ф. Бродников, Н. Н. Достовалов. – Новосибирск : СГУГиТ, 2020. – 51 с.  
ISBN 978-5-907320-63-5

Учебное пособие «Метрологическое обеспечение теплотехнических измерений. Основы термометрии» подготовлено кандидатом технических наук Н. А. Вихаревой, ассистентом Н. Н. Достоваловым на кафедре специальных устройств инноватики и метрологии СГУГиТ и кандидатом технических наук, научным сотрудником Института ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН А. Ф. Бродниковым,

Учебное пособие по дисциплине «Метрологическое обеспечение теплотехнических измерений» содержит сведения по разделу «Основы термометрии»: международная температурная шкала, поверка (калибровка) контактных средств измерения температуры (жидкостные стеклянные и манометрические термометры, термопреобразователи сопротивления, термоэлектрические преобразователи, вторичные термометрические приборы), поверка (калибровка) бесконтактные средства измерений температуры (радиационные термометры).

Учебное пособие по дисциплине «Метрологическое обеспечение теплотехнических измерений» предназначено для обучающихся старших курсов очной, заочной и очно-заочной форм обучения по направлению подготовки 27.03.01 Стандартизация и метрология (уровень бакалавриата).

Рекомендовано к изданию кафедрой специальных устройств, инноватики и метрологии, Ученым советом Института оптики и технологий информационной безопасности СГУГиТ.

Печатается по решению редакционно-издательского совета СГУГиТ

УДК 006

ISBN 978-5-907320-63-5

© СГУГиТ, 2020

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение .....	4
1. Основы термометрии. Температурные шкалы .....	5
2. Контактные средства измерений температуры .....	11
3. Радиационная термометрия.....	26
4. Эталоны и поверочная схема для средств термометрии .....	31
Заключение .....	47
Библиографический список.....	49

## ВВЕДЕНИЕ

Термометрия – наиболее распространенный вид теплового измерения. Температура – одна из семи основных физических величин, образующих Международную систему единиц измерений (СИ) [1]. Она определяет степень «нагретости» тел, зависящей от энергии движения (поступательного, колебательного и вращательного) частиц, из которых состоят эти тела.

Тела могут находиться в трех основных состояниях: твердом, жидком и газообразном. Эти состояния называют агрегатными, или фазовыми. Переход вещества, из которого состоит тело, из одного агрегатного состояния в другое называют фазовым переходом. К таким переходам относятся плавление, кипение, конденсация и затвердевание [2].

Температура является глобальной физической величиной, характеризующей все происходящие в природе процессы и явления. Естественно, что ее количественная оценка требует измерений, которые, как известно, представляют собой совокупность операций, выполняемых с целью определения значения физической величины при помощи специальных технических средств. Специальные технические средства, предназначенные для измерений температуры, называют термометрами.

Поверка (калибровка) средств измерения температуры – наиболее популярный вид метрологической деятельности. Поэтому метрологическое обеспечение средств измерений данной области актуальная проблема последнего десятилетия [3, 4].

## 1. ОСНОВЫ ТЕРМОМЕТРИИ. ТЕМПЕРАТУРНЫЕ ШКАЛЫ

Развитие термометрии связано с изобретением в конце XVI в. Г. Галилеем термоскопа, позволяющего визуально наблюдать изменения температуры [5, 6]. Принцип действия прибора был основан на давно известном свойстве воздуха расширяться при нагревании. В первых термоскопах шкала в лучшем случае представляла лишь равноудаленные друг от друга метки (рис. 1).

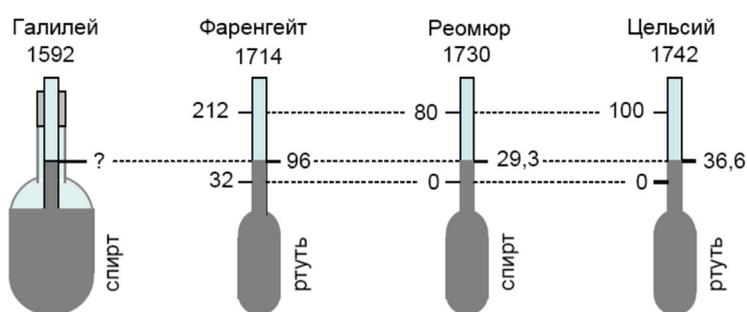


Рис. 1. Условные температурные шкалы

Г. Фаренгейт в 1714 г. в качестве термометрической жидкости предложил использовать ртуть, поскольку она расширяется при нагревании равномерно и сохраняет жидкое состояние в широком диапазоне температур. Однако его настоящим новаторством стали две надежные фиксированные и легко воспроизводимые реперные точки шкалы – температура таяния чистого льда, которой приписывалось значение 32 и кипения воды – 212. В дальнейшем Р. А. Реомюром (1730 г.) и А. Цельсием (1742 г.) были предложены другие значения температур фазовых переходов и соответствующие им шкалы. Температура таяния льда в этих шкалах стала принята равной нулю, значения же температуры кипения воды различались – 80 и 100 градусов для шкал Реомюра и Цельсия соответственно.

Единицы измерения температуры по этим шкалам образовывались делением интервала между температурами фазовых переходов воды на 180, 80 и 100 равных частей для шкал Фаренгейта ( $^{\circ}\text{F}$ ), Реомюра ( $^{\circ}\text{R}$ ) и Цельсия ( $^{\circ}\text{C}$ ) соответственно. По аналогии с единицей угла, одна такая часть была названа градусом. Понятие «реперная точка» было предложено Р. А. Реомюром.

В последующие два столетия введение температурных шкал способствовало развитию науки и технологий. Ранее предполагалось, что зависимость между увеличением температуры термометрической жидкости и ее объемом линейна. В дальнейшем оказалось, что отклонение от линейности, например, для ртути при температуре  $50\text{ }^{\circ}\text{C}$  вызывает погрешность около  $0,25\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Все перечисленные выше шкалы имеют этот недостаток и называются условными.

Главными требованиями к основным реперным точкам при построении температурных шкал являются стабильность и воспроизводимость значения температуры фазового перехода, на котором основана эта точка. Основной реперной точкой многих шкал являлась температура плавления (таяния) льда, равная  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  ( $273,15\text{ K}$ ).

Для воспроизведения температуры таяния льда применяются нуль-термостаты, устройство которых приведено на рис. 2.

В защитном корпусе 1 (рис. 2, а) находится теплоизолированный сосуд 2, в который засыпают смесь 3, состоящую из дробленого льда или снега и жидкой воды. Для приготовления смеси используется чистая дистиллированная вода. Через трубку 4 удаляют излишки воды, образующейся на дне сосуда при таянии льда.

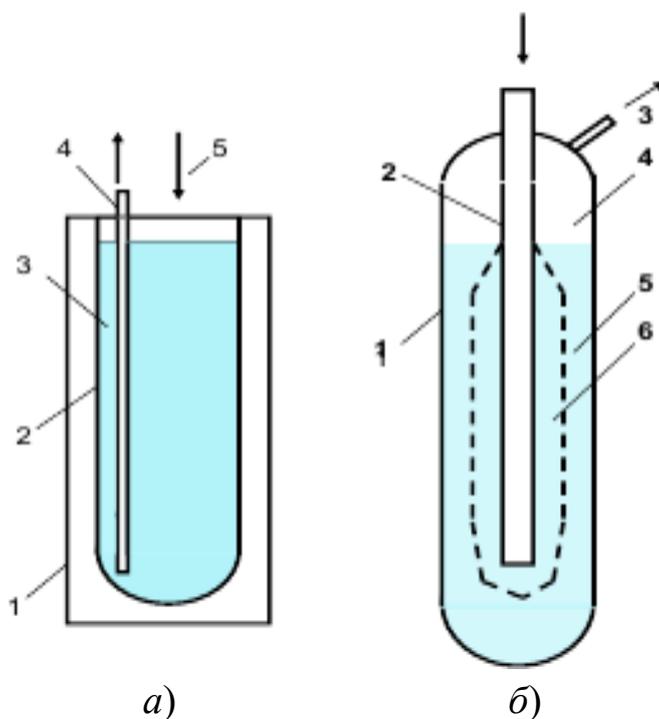


Рис. 2. Устройства воспроизведения температур  $0$  и  $0,01\text{ }^{\circ}\text{C}$ :

а) нуль-термостат; б) ампула тройной точки воды

В момент стабилизации показаний поверяемого термометра 5 определяют температуру таяния  $T_x$ . Значение абсолютной погрешности термометра  $\Delta$  равно разности

$$\Delta = T_x - T_0, \quad (1)$$

где  $T_0 = 0 \text{ }^\circ\text{C}$  – температура таяния льда.

Поскольку нуль-термостаты поддерживают фазовый переход с достоверно известным значением температуры, они применяются в качестве эталона при поверке средств измерений методом прямых измерений.

Применение нуль-термостатов ограничено ввиду достаточно большой погрешности воспроизведения ими температуры таяния льда, в лучшем случае составляющей  $1 \cdot 10^{-3} \text{ }^\circ\text{C}$ , и соответствует лишь уровню эталонов 1-го разряда. Как правило, при проведении поверки погрешность эталона должна быть в три раза меньше, чем у поверяемых им средств измерений. Поэтому с помощью реперной точки таяния льда можно проводить поверку только термометров, имеющих погрешность более  $0,03 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Для получения более высоких показателей стабильности и воспроизводимости основной реперной точки шкалы в данный момент времени используется температура тройной точки воды, при которой вода в замкнутом объеме (ампуле) находится одновременно твердом, жидком и газообразном состоянии.

К ампулам тройной точки любого вещества предъявляются повышенные требования по герметичности, химической инертности и максимальной чистоте используемого вещества.

Ампула тройной точки воды, показанная на рис. 2, б, состоит из стеклянной колбы 1, заполненной химически чистой водой ( $\text{H}_2\text{O}$ ) на  $4/5$  высоты. В ампуле происходит кипение воды и образование насыщенного пара над поверхностью жидкой фазы даже при комнатной температуре, что достигается разреженным давлением (более чем в тысячу раз меньше атмосферного) вследствие откачки воздуха через патрубок 2 и последующей его запайки.

Третью фазу воды образуют охлаждением термометрической пробирки, например, обдуванием ее внутренности холодными парами жидкого

азота, приводящим к намораживанию на ее внешней поверхности слоя льда. Температура такого трехфазного состояния воды всего лишь на 0,01 °С выше температуры таяния льда. Поэтому для сохранения на длительное время в ампуле с тройной точкой третьей (ледяной) фазы ее помещают в контейнер с тающим льдом. Это сводит к минимуму теплообмен ампулы с внешней средой.

Воспроизводимость и нестабильность температуры тройной точки воды достигает значения  $2 \cdot 10^{-5}$  °С. Это наиболее стабильный из всех известных в природе процессов, примерно в 50 раз превосходящий по указанным характеристикам температуру плавления льда. Поэтому в 1960 г. было утверждено новое определение единицы температуры как  $1/273,16$  части интервала между абсолютным нулем и температурой тройной точки воды – главной реперной точки температурной шкалы. Ей приписано значение 273,16 К (0,01 °С).

Стремление к обеспечению международного единства измерений температуры, а также к получению ее значений, максимально близких к термодинамическим, стимулируют ведущиеся в развитых странах исследования, направленные на совершенствование методов и средств воспроизведения и передачи единицы температуры и температурной шкалы. Эти работы координируют международные метрологические организации: Международный комитет по мерам и весам (МКМВ) и Международное бюро по мерам и весам (МБМВ). Полученные по результатам исследований уточнения температурной шкалы, в частности, значений температуры реперных точек, усредняют, обрабатывают и согласовывают в Консультационном комитете по термометрии, созданном при этих организациях. Затем данный комитет рекомендует такую шкалу к утверждению Генеральной конференцией по мерам и весам – высшему международному органу, созданному в рамках Метрической конвенции [7].

Утвержденную Генеральной конференцией температурную шкалу, основанную на обобщении результатов исследований, полученных в разных странах, называют Международной температурной шкалой (МТШ). Главная задача, которую решают принятием такой шкалы, – это обеспечение правового международного единства (сопоставимости результатов) измерений температуры. Другая задача – это практическая направленность

внедрения шкалы, так как в описании шкалы приводятся сведения о реальных методах и средствах ее воспроизведения и передачи национальными эталонами. Поэтому в названии международной шкалы длительное время использовалось слово «практическая». Первая Международная температурная шкала была принята в 1927 г. (МТШ-27).

В настоящее время действует шкала МТШ-90. Основной температурный интервал шкалы находится между температурой тройной точки воды, которой приписано точное значение 273,16 К (0,01 °С), и абсолютным (виртуальным) нулем температуры. Единица температуры – кельвин (К), определена как 1/273,16 часть основного температурного интервала (температуры тройной точки воды). При этом соблюдается тождественное равенство единиц температуры в абсолютной шкале (шкале Кельвина) и в шкале Цельсия (1 К ≡ 1 °С). Это обусловлено тем, что, как было показано выше, абсолютная шкала строилась на основе шкалы Цельсия. Так как температура таяния льда (воды) не изменила своего значения, равного 0 °С (273,15 К), то и связь между значениями температуры в этих шкалах сохранилась прежней:

$$t, \text{ } ^\circ\text{C} = T, \text{ К} - 273,15;$$

$$T, \text{ К} = t, \text{ } ^\circ\text{C} + 273,15.$$

МТШ-90 воспроизводится с помощью реперных точек, которые приведены в табл. 1. Точки плавления и затвердевания указаны для нормального атмосферного давления 101 325 Па (760 мм рт. ст.).

Период (примерно в 20 лет), обновления международной шкалы в настоящее время не выдержан. Это связано с двумя основными причинами:

– отсутствие новых значимых результатов исследований, являющихся основанием для уточнения шкалы;

– проведение подготовки к переопределению единиц основных физических величин (килограмма, ампера, моля и кельвина) через уточненные и фиксированные значения фундаментальных констант.

Равновесные состояния и присвоенные им значения температуры  
по МТШ–90

Состояние равновесия	Температура	
	$T_{90}$ , К	$t_{90}$ , °С
1. Давление насыщенного пара He	~ 3	~ -270,15
2. Тройная точка водорода H <sub>2</sub>	13,8333	-259,3467
3. Тройная точка неона Ne	24,5561	-248,5939
4. Тройная точка кислорода O <sub>2</sub>	54,3584	-218,7916
5. Тройная точка аргона Ar	83,8058	-189,3442
6. Тройная точка ртути Hg	234,3156	-38,8344
7. Тройная точка воды H <sub>2</sub> O	273,16	0,01
8. Точка плавления галлия Ga	302,9146	29,7646
9. Точка затвердевания индия In	429,7485	156,5985
10. Точка затвердевания олова Sn	505,078	231,928
11. Точка затвердевания цинка Zn	692,677	419,527
12. Точка затвердевания алюминия Al	933,473	660,323
13. Точка затвердевания серебра Ag	1234,93	961,78
14. Точка затвердевания золота Au	1337,33	1064,18
15. Точка затвердевания меди Cu	1357,77	1084,62

Для определения единицы температуры предлагается использовать фиксированное значение фундаментальной константы Больцмана, которая устанавливает связь между энергией движения частиц, из которых состоит тело, и его температурой. Работы по подготовке новых определений основных величин проводятся в ведущих метрологических институтах мира (под руководством МКМВ и МВМВ) и близки к завершению.

## 2. КОНТАКТНЫЕ СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЙ ТЕМПЕРАТУРЫ

К контактными средствам измерений температуры относятся жидкостные стеклянные термометры, манометрические термометры, термоэлектрические термометры и термометры сопротивления.

*Жидкостные стеклянные термометры* являются исторически первыми средствами измерений температуры. Принцип действия таких термометров основан на зависимости объема жидкости от температуры. Эти термометры предназначены для использования в диапазоне от минус 200 до 600 °С с минимально достижимой погрешностью 0,001 °С [8].

Изменение объема термометрической жидкости при изменении ее температуры характеризуют температурным коэффициентом объемного расширения  $\beta$ .

При работе с жидкостными термометрами необходимо учитывать, что под влиянием температуры расширяется не только термометрическая жидкость, но и ее стеклянные резервуар и капилляр, в которых находится жидкость. Поэтому при повышении температуры наблюдатель видит изменение объема жидкости, уменьшенное с учетом изменения объема резервуара и капилляра.

В зависимости от диапазона измерений и требуемой точности, в стеклянных термометрах могут применяться термометрические жидкости, такие как этиловый спирт, толуол, эфир, керосин, пентан и другие, но наибольшее распространение получила ртуть. В табл. 2 приведены некоторые характеристики основных термометрических жидкостей.

По конструктивному исполнению стеклянные жидкостные термометры бывают палочными (рис. 3, а), с вложенной шкалой (рис. 3, б) и с наружной шкалой (рис. 3, в).

Шкалу термометров палочного типа наносят непосредственно на наружную поверхность капиллярной трубки, а шкалу термометров с вложенной и наружной шкалой – на прямоугольную однородную и контрастную по цвету пластину [9].

## Характеристики термометрических жидкостей

Жидкость	Пределы измерений		Средние значения коэффициента $\beta$ , $K^{-1}$
	нижний	верхний	
Ртуть	-35	600	0,000 18
Этиловый спирт	-80	80	0,001 05
Толуол	-90	200	0,001 09
Эфир	-120	25	0,001 52
Пентан	-200	20	0,000 92

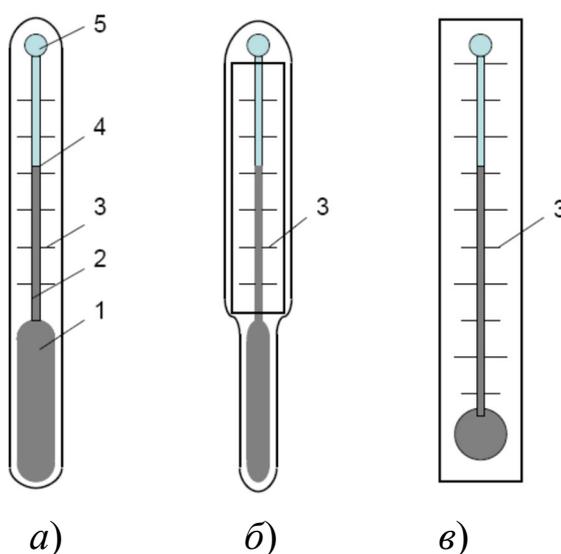


Рис. 3. Устройство и типы жидкостных стеклянных термометров:

- а) палочные; б) с вложенной шкалой; в) с наружной шкалой;  
 1 – основной резервуар; 2 – капилляр; 3 – шкала; 4 – уровень жидкости;  
 5 – дополнительный резервуар

Стеклянные термометры, в основном палочные, могут применяться в качестве разрядных эталонов и средств измерений общего назначения. В зависимости от условий эксплуатации термометры могут быть полного и частичного погружения.

К достоинствам стеклянных термометров следует отнести простоту эксплуатации, достаточно высокую точность и компактность, а также возможность использования в помещениях с повышенной опасностью. Их недостатки: хрупкость, высокая токсичность ртути, невозможность дистанционных измерений.

*Манометрические термометры*, как и жидкостные стеклянные термометры, относятся к контактным неэлектрическим средствам измерений температуры. Их принцип действия основан на зависимости давления жидкости или газа, находящегося при постоянном объеме, от измеряемой температуры. Температурный диапазон использования этих термометров от минус 200 до 650 °С.

В жидкостных манометрических термометрах используется силиконовое масло, что позволяет их использовать в достаточно широком диапазоне температур от минус 100 до 250 °С. За пределами этого диапазона затруднено использование жидкостей, вместо их применяется газ – азот или аргон.

Минимальная погрешность, которую обеспечивают манометрические термометры, составляет 0,5 °С.

Устройство манометрического термометра представлено на рис. 4.

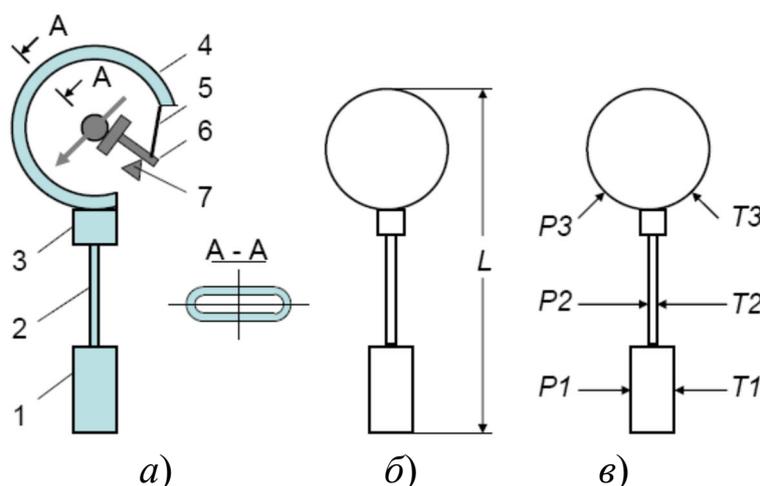


Рис. 4. Манометрический термометр:

а) устройство: 1 – термобаллон, 2 – капилляр, 3 – основание манометра; 4 – упругий элемент; 5 – поводок; 6 – коромысло; 7 – призма; б) источник гидростатической погрешности ( $L$  – разность уровней установки и манометрического прибора); в) источник барометрической погрешности ( $P_1, T_1; P_2, T_2; P_3, T_3$  – внешнее давление и температура, воздействующие соответственно на термобаллон, капилляр и манометр)

Чувствительным элементом термометра такого типа является термобаллон 1, соединенный капилляром 2 с манометрическим прибором 3. Термобаллон и капилляр изготавливают из нержавеющей стали, латуни или

меди. Длина капилляра может составлять от 0,6 до 60 м, что позволяет проводить дистанционное измерение температуры, прокладывая капилляр подобно электрическому проводу.

Изменение температуры приводит к изменению давления в системе и деформации упругого элемента 4, который, перемещая поводок 5, поворачивает коромысло 7 с сектором около опоры в виде призмы 6. При этом стрелка манометра поворачивается и устанавливается в положение, соответствующее измеряемому давлению и, соответственно, температуре жидкости или газа в термобаллоне. Шкалу манометрического прибора градуируют в градусах Цельсия.

Одним из возможных источников погрешности таких термометров является барометрическая погрешность, вызванная влиянием внешнего давления, и гидростатическая погрешность, обусловленная давлением столба жидкости в капилляре, если термобаллон и манометрический прибор находятся на разной высоте.

Еще одной разновидностью манометрических термометров являются парожидкостные термометры, основанные на однозначной зависимости давления насыщенного пара жидкости от температуры, на значение которого не влияют внешние факторы. Для этого термобаллон заполняют примерно на 4/5 объема органической жидкостью, в которую погружают капилляр. При этом термобаллон над поверхностью жидкости заполняется ее насыщенным паром, давление которого измеряют манометрическим прибором. Парожидкостные термометры имеют неравномерную шкалу и низкую чувствительность термометра в начале диапазона измерений, что связано с сильной нелинейностью зависимости давления пара от температуры.

К достоинствам манометрических термометров можно отнести простоту конструкции и эксплуатации, а также высокую надежность. Как и стеклянные, манометрические термометры изготавливаются из материалов, исключающих искрообразование, и не требуют для своей работы наличия электрических цепей, что позволяет использовать их в помещениях с повышенной опасностью. Но, в отличие от стеклянных, манометрические термометры имеют важное преимущество, заключающееся в возможности дистанционного измерения температуры.

К недостаткам манометрических термометров можно отнести большую погрешность измерений и их инерционность, а также невозможность ремонта в случае нарушения герметичности термометра.

Наиболее распространенными контактными термометрами, основанными на преобразовании измеряемой температуры в электрический сигнал, являются термоэлектрические преобразователи и термометры сопротивления.

Принцип действия *термометров сопротивления* основан на зависимости электрического сопротивления  $R$  проводников или полупроводников от температуры  $T$ :

$$R = R(T). \quad (2)$$

Они являются самыми точными средствами измерений температуры, составляющими основу всех национальных эталонов в указанном, наиболее востребованном, диапазоне температуры от минус 260 до 1 100 °С с минимально достижимым значением погрешности  $5 \cdot 10^{-5}$  °С.

Термометры сопротивления, в отличие от рассмотренных выше стеклянных и манометрических термометров, являются более сложными устройствами, которые состоят как минимум из двух составных частей: первичного измерительного термопреобразователя и вторичного измерительного прибора. Термопреобразователь, выполненный в виде изделия, является датчиком температуры. В нем происходит преобразование измеряемого значения температуры в выходной электрический сигнал, удобный для дистанционной передачи, обработки, отображения, регистрации и архивирования, а также для управления устройствами автоматического регулирования температуры [10–13].

Вторичный прибор, как правило, имеет отсчетное устройство, на котором отображаются измеренные значения в единицах температуры (°С) или сопротивления (Ом). В последнем случае для получения значений измеренной температуры используют зависимость сопротивления от температуры, которая установлена для данного типа термопреобразователя в виде специальных таблиц или функций преобразования. Эти функции преобразования для стандартизованных типов термопреобразователей сопротивления назы-

вают номинальными статическими характеристиками преобразования (НСХ). Для стандартизованных типов термопреобразователей необходимо использовать вторичный прибор, который имеет такую же характеристику преобразования. Это дает возможность правильно преобразовать измеренные значения сопротивления в значения измеряемой температуры.

На рис. 5 изображен платиновый термометр сопротивления и его чувствительный элемент. В состав датчика входит чувствительный элемент 1, защитный чехол 2, предохраняющий от механических и других вредных воздействий среды на чувствительный элемент. В верхней части защитного чехла имеется клеммная головка с крышкой 3, обеспечивающей доступ к клеммам 5. Они служат для подключения вторичного прибора к соединительным проводам. Головка снабжена специальным патрубком 4, который позволяет герметизировать вывод проводов, идущих к вторичному прибору 8. Это позволяет исключить нежелательные воздействия внешней среды на электрические контакты.

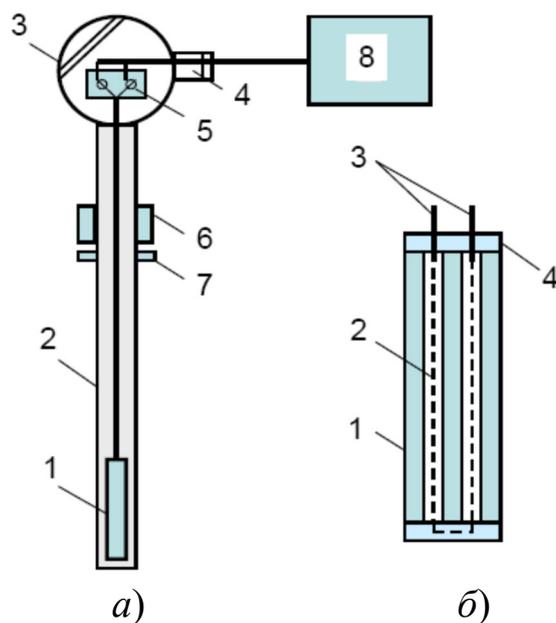


Рис. 5. Устройство термометра сопротивления:

*a)* датчик и вторичный прибор: 1 – чувствительный элемент с соединительными проводами; 2 – защитный чехол; 3 – крышка клеммной головки; 4 – выходной патрубок; 5 – клеммы; 6 – монтажная гайка; 7 – ограничительное кольцо; 8 – вторичный прибор; *б)* чувствительный элемент: 1 – двухканальная керамика; 2 – платиновая спираль; 3 – контакты; 4 – заливка

Для монтажа датчика на объект имеется ограничительное кольцо 7, определяющее необходимую глубину погружения в трубопровод, печь или другой объект, а также монтажную гайку 6, которая имеет стандартные размеры и резьбу (рис. 5, а).

Защитный чехол изготавливают из тонкостенной нержавеющей трубки, которая имеет диаметр обычно от 5 до 30 мм и длину от 50 до 3 000 мм. Его размеры определяют условиями конкретной измерительной задачи. Чехол, как правило, засыпают электроизоляционным порошком из окиси алюминия ( $Al_2O_3$ ). Этот порошок осуществляет тепловой контакт защитного чехла с чувствительным элементом и электрическую изоляцию внутренних электрических цепей датчика, а также минимизацию влияния вибрации, ударов и прочих механических воздействий на чувствительный элемент.

Чувствительный элемент из платиновой проволоки (рис. 5, б) чаще всего изготавливают из двухканальной керамической трубки 1 длиной от 30 до 50 мм и диаметром от 2 до 5 мм. Снизу в каналы трубки диаметром около 1 мм вставляют спираль 2, изготовленную из тонкой платиновой проволоки диаметром от 30 до 50 мкм. Затем заливают перемычку спирали и отверстия каналов на нижнем торце керамики специальной эмалью 4. К концам спирали приваривают контакты 3, изготовленные из небольших отрезков более толстой (0,5 мм) платиновой проволоки, которые вставляют наполовину в каналы керамики, засыпают каналы порошком окиси алюминия и заливают их сверху эмалью. Засыпка служит, прежде всего, для предотвращения сползания и замыкания витков спирали, а также для обеспечения их теплового контакта с керамикой. К контактам чувствительного элемента приваривают или припаивают соединительные провода. Чтобы исключить заметное влияние на результат измерений сопротивления чувствительного элемента и, соответственно, температуры, сопротивление этих проводов должно быть незначительным.

В термометрах сопротивления применяются чувствительные элементы, изготовленные из платины, никеля или меди, а также из полупроводниковых материалов (рис. 6).



Рис. 6. Эталонный термодатчик сопротивления 2-го разряда

Чувствительный элемент эталонных термометров сопротивления, как правило, изготавливают в виде спирали из высокочистой платины, закрепленной на пластинке из кварцевого стекла. Для каждого эталонного термометра устанавливают индивидуальную характеристику преобразования измеряемой температуры  $T$  в значение  $W_R(T)$  относительного электрического сопротивления. Значение  $W_R(T)$  равно отношению сопротивления  $R(T)$  термометра при температуре  $T$  к его сопротивлению  $R(TTB)$  при температуре тройной точки воды. Такие термометры в соответствии с МТШ-90 используют в качестве эталонных интерполяционных приборов в диапазоне от тройной точки водорода до затвердевания меди. Для этого в реперных точках устанавливают и периодически подтверждают индивидуальную температурную зависимость относительного сопротивления  $W_R(T_{90})$  эталонного термометра в виде функции отклонения  $\Delta W_R(T_{90})$  от стандартной функции  $W_R^{CT}(T_{90})$ , принятой МТШ-90 для относительного сопротивления гипотетического (идеализированного) платинового термометра (табл. 3):

$$\Delta W_R (T_{90}) = W_R (T_{90}) - W_R^{CT} (T_{90}). \quad (3)$$

Номинальные статические характеристики преобразования термометров обычно приводят в виде таблиц или полиномов и обозначают, например: 1П, 5П, 25П, 500П. Буква «П» обозначает, что чувствительный элемент выполнен из платины. Цифры в обозначении НСХ указывают сопротивление  $R_0$  (Ом) чувствительного элемента при температуре  $0^\circ\text{C}$ . НСХ чувствительных элементов из меди обозначают буквой «М». Международные обозначения НСХ имеют вид, например Pt10 или Cu10.

Значения  $W_R^{CT}(T_{90})$  в реперных точках МТШ-90

Реперная точка*	Температура	$W_R^{CT}(T_{90})$
ТТ (H <sub>2</sub> )	13,8033 К	0,00119007
ТТ (Ne)	24,5561 К	0,00844974
ТТ (O <sub>2</sub> )	54,3584 К	0,09171894
ТТ (Ar)	83,8058 К	0,21585975
ТТ (Hg)	234,3156 К	0,84414211
ТТ (H <sub>2</sub> O)	0,01 °С	1,000000
ТП (Ga)	29,7646 °С	1,11813889
ТЗ (In)	156,5985 °С	1,60980185
ТЗ (Sn)	231,928°С	1,89279768
ТЗ (Zn)	419,527°С	2,56891730
ТЗ (Al)	660,323°С	3,37600860
ТЗ (Ag)	961,78°С	4,28642053

Примечание: ТТ – тройная точка; ТП – точка плавления; ТЗ – точка затвердения.

В качестве вторичных измерительных приборов, преобразующих сопротивление датчика в соответствующее значение температуры, ранее применялись шкальные магнитоэлектрические приборы (логометры) и мосты автоматического и ручного и уравнивания, но они были вытеснены цифровыми и микропроцессорными приборами. В табл. 4 приведены значения  $R_0$ , а также допускаемые отклонения сопротивления чувствительных элементов от НСХ (°С) в зависимости от класса допуска А, В, или С по ГОСТ 6651–2009 [13].

В современной термометрии самыми точными и стабильными средствами измерения являются платиновые термометры сопротивления. Такие термометры могут иметь очень компактные чувствительные элементы размером  $2,5 \times 2,5 \times 0,5$  мм. Термометры сопротивления, выполненные из меди, обладают меньшей стабильностью и точностью, чем платиновые, и используются в диапазоне температур от минус 100 до 180 °С.

Термометры сопротивления обеспечивают наиболее точные дистанционные измерения температуры с возможностью отображения и дальнейшей обработки полученных результатов. Однако при этом необходимо принимать

специальные меры для исключения влияния на результаты измерений сопротивления проводов, соединяющих датчик с вторичным прибором (рис. 7).

Таблица 4

Допускаемые отклонения сопротивления чувствительности элементов

Класс допуска	$R_0$ , Ом	Допускаемые отклонения $\Delta T$ в зависимости от измеряемой температуры ( $T$ ), °С
A	50 ± 0,025 100 ± 0,050 500 ± 0,250	± 0,15 + 0,002 T
B	50 ± 0,050 100 ± 0,100	± 0,30 + 0,005 T
C	50 ± 0,100 100 ± 0,200	± 0,60 + 0,0065 T



Рис. 7. Обычные термодатчики сопротивления

Работа *термоэлектрических термометров* основана на возникновении в электрическом контакте (соединении) двух разнородных проводников термоэлектродвижущей силы  $e$  (ТЭДС), значение которой зависит от температуры  $T$  в месте их соединения:

$$e = e(T). \quad (4)$$

Такие термометры используют в диапазоне от минус 200 до 2500 °С. Минимальная погрешность 0,01 °С.

Термоэлектрические термометры являются комплектом, состоящим из термоэлектрического термопреобразователя (термодатчика) и вторичного измерительного прибора, отображающего сигналы датчика в значениях температуры (°С) или ТЭДС (мВ). Чувствительным элементом термоэлектрических преобразователей температуры является термопара (рис. 8, *а*). Она состоит из двух проводников (термоэлектродов 2) из разнородных металлов и/или сплавов, два конца которых имеют между собой электрический контакт (спай 1). Два других конца 3 термоэлектродов, называемых свободными концами, подключены к вторичному прибору (милливольтметру 4) [14].

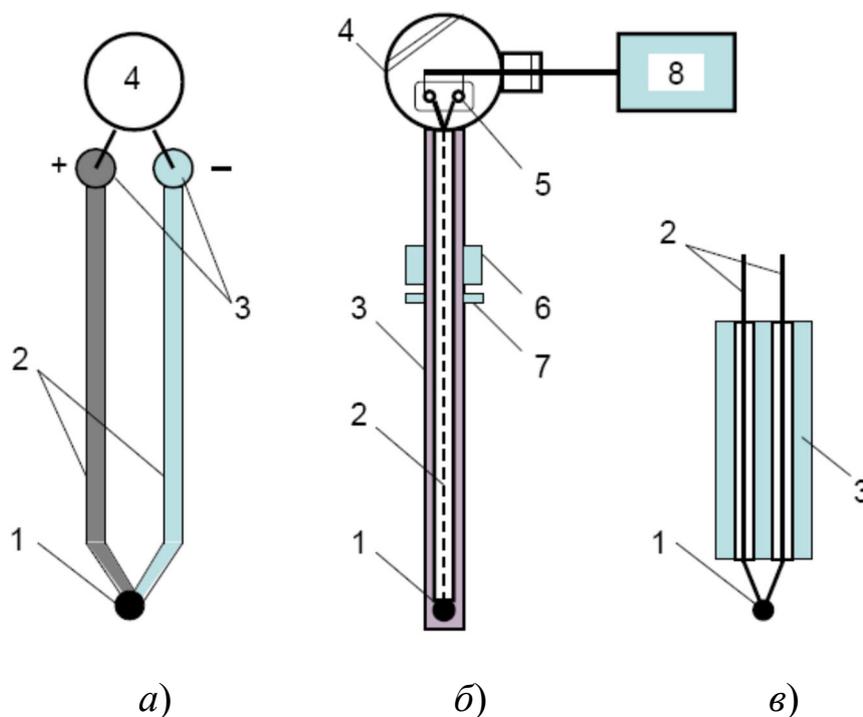


Рис. 8. Принцип действия и устройство термоэлектрических термодатчиков:

*а*) термопара: 1 – спай; 2 – термоэлектроды; 3 – свободные концы; 4 – милливольтметр; *б*) термоэлектрический термометр: 1 – чувствительный элемент; 2 – термоэлектроды с электроизоляцией; 3 – защитный чехол; 4 – клеммная головка; 5 – клеммы; 6 – монтажная гайка; 7 – ограничительное кольцо; 8 – вторичный прибор; *в*) чувствительный элемент: 1 – спай; 2 – термоэлектроды; 3 – электроизоляция

Таким образом, устройство чувствительного элемента термоэлектрического датчика температуры является достаточно простым. При его изготовлении между термоэлектродами должен быть обеспечен надежный электрический контакт с помощью сварки или пайки.

При нагревании спая возникает термоэлектрический сигнал, пропорциональный измеряемой температуре. Его полярность зависит от свойств термоэлектродов, один из которых является положительным, а другой – отрицательным. Термоэлектроды изолируют друг от друга двухканальной керамикой или отрезками керамической трубки, которые нанизывают на термоэлектроды в виде бус (рис. 8, в). Все это помещают в защитный чехол 3 (рис. 8, б), который изготавливают в виде пробирки из нержавеющей стали. Вторичный прибор 8 подключается к термоэлектродам 2, идущим от спая 1 через клеммы 5, расположенные в головке 4. Крепление датчика на объекте производится с помощью гайки 6 и ограничительного кольца 7. На рис. 9 приведен внешний вид термоэлектрического термометра.



Рис. 9. Термоэлектрические датчики температуры

Связь ТЭДС таких датчиков с температурой зависит только от свойств материала термоэлектродов. Однако значения ТЭДС зависят еще и от температуры  $T_0$  свободных концов термоэлектродов, которые присоединяют

к удлинительным проводам или клеммам вторичного прибора, измеряющего ТЭДС. Следовательно, в общем случае зависимость ТЭДС от температуры имеет вид

$$e = e(T, T_0). \quad (5)$$

Чем ближе значение температуры  $T_0$  к измеряемой температуре, тем меньше сигнал (ТЭДС) термопары. Для получения однозначной зависимости  $e$  от  $T$  условились определять ее при температуре  $T_0$  свободных концов, равной  $0\text{ }^\circ\text{C}$ . Для этого их соединение, например, с медными проводами, идущими к вторичному прибору, помещают в тающий лед. Для эталонных термоэлектрических датчиков эту зависимость определяют индивидуально. Для наиболее распространенных типов пар термоэлектродов, используемых в качестве чувствительных элементов средств измерений, установлены стандартные, усредненные зависимости ТЭДС от температуры. Их так же, как для термопреобразователей сопротивления, называют номинальными статическими характеристиками преобразования.

В России наиболее распространены термопары, обозначения и характеристики которых приведены в ГОСТ Р 8.585–2001 [15] (табл. 5).

Таблица 5

Обозначения и характеристики термопар

НСХ	Название термоэлектродов	Диапазон, $^\circ\text{C}$	Чувствительность, мкВ / $^\circ\text{C}$
ПП (S)	Платинородий (10 % Rh) – платина	от 0 до 1 300 (1 600)	от 5 до 12
ПР (B)	Платинородий (30 % Rh) – платинородий (6 % Rh)	от 300 до 1 600 (1 800)	от 3 до 12
ХА(К)	Хромель (90% Ni, 10 % Gr) – алюмель (94 % Ni, 6 %Al, Co)	от – 200 до 1 100 (1 300)	от 15 до 42
ХК (L)	Хромель (90 % Ni, 10 % Gr) – копель (56 % Cu, 44 % Ni)	от – 200 до 600 (800)	от 28 до 80
ВР (A)	Вольфрамрений (5 % Re) – вольфрамрений (20 % Re)	от 0 до 2 200 (2 500)	от 8 до 12

Поверку термоэлектрических датчиков осуществляют методом непосредственного сличения с эталонными термометрами в термостатах (до 250 °С), в печах (выше 100 °С) или методом прямых измерений в калибраторах температуры (до 650 °С) и в реперных точках (до 1 800 °С). Термоэлектрические термометры являются достаточно точными и стабильными средствами современной термометрии. Они могут обеспечивать погрешность, равную 0,01 °С, и занимают третье место по точности после платиновых и ртутных термометров.

Термоэлектрические термометры обеспечивают дистанционное измерение температуры. Однако при этом необходимо принимать специальные меры для учета влияния температуры свободных концов термоэлектродов датчика при их соединении с вторичным прибором.

Возможность преобразования измеренных значений температуры в электрические величины, которую обеспечивают термометры сопротивления и термоэлектрические термометры, позволяет осуществить отсчет ее значений с помощью вторичных термометрических приборов. При этом вторичные приборы как минимум отображают на цифровом индикаторе значения измеряемой температуры или сопротивления и ТЭДС соответствующих датчиков. Структурная схема такого прибора приведена на рис. 10.

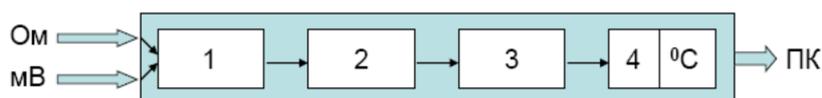


Рис. 10. Структурная схема цифрового термометрического прибора:

1 – входные измерительные цепи и аналоговый усилитель; 2 – аналого-цифровой преобразователь; 3 – микропроцессор; 4 – устройства отображения и связи с ПК

В качестве примера приведены фотографии внешнего вида микропроцессорного цифрового вторичного прибора «Теркон» (рис. 11).

Поверку и калибровку вторичных термометрических приборов проводят с помощью эталонов электрических величин. Все большее распространение получают специальные калибраторы – имитаторы сигналов термометрических датчиков (рис. 12).



Рис. 11. Прецизионный преобразователь сигналов «ТЕРКОН»



Рис. 12. Имитатор сигналов ИСК-1

Выбор вторичных термометрических приборов зависит от возможностей применения определенного типа датчиков, их диапазона и погрешности измерений, быстродействия, необходимости автоматической регистрации и обработки информации, условий эксплуатации, а также их стоимости.

### 3. РАДИАЦИОННАЯ ТЕРМОМЕТРИЯ

Бесконтактные средства измерений температуры, традиционно называемые пирометрами, используют законы теплового электромагнитного излучения нагретых тел [16]. Пирометры (от греческого «пирос» – огонь) первоначально использовались только при измерениях высоких значений температуры. Это связано с тем, что принцип действия пирометров основан на оценке наблюдателем яркости свечения нагретых тел, которое становится видимым лишь выше 600 °С. Максимальная яркость наиболее эффективных тепловых излучателей соответствует длине волны  $\lambda_{\max}$  излучения, которая определяется законом Вина:

$$\lambda_{\max} \cong \frac{2800}{T} \text{ (мкм)}, \quad (6)$$

где  $T$  – значение температуры излучателя, К.

Например, при  $T = 280 \text{ К}$  ( $\approx 7 \text{ °С}$ ) максимум яркости соответствует длине волны  $\lambda_{\max} \approx 10 \text{ мкм}$ . Поэтому современные пирометры, позволяющие измерять температуру от минус 70 °С, используют фотоприемники, имеющие спектральный диапазон чувствительности от 8 до 14 мкм, соответствующий инфракрасному диапазону длин волн теплового излучения.

Такие низкотемпературные бесконтактные измерители температуры принято называть обобщающим термином – радиационные термометры, и только высокотемпературные радиационные термометры – пирометрами. Радиационная термометрия – раздел термометрии, посвященный бесконтактным методам и средствам измерений температуры.

Термометры (пирометры), основанные на измерениях яркости, называют *яркостными*. Для получения однозначной зависимости яркости от температуры в них используют светофильтры, обычно, красного цвета, которые соответствуют наибольшей яркости в видимом диапазоне длин волн. Видимый диапазон наиболее востребован в металлургических процессах

для бесконтактных измерений температуры от 800 °С и выше. С учетом этого такие пирометры называют яркостными монохроматическими.

Принципиальная схема классического яркостного пирометра приведена на рис. 13. Излучение от нагретого объекта 1 проходит через объектив 2 и фокусируется в плоскости нити накала специальной пирометрической лампочки 4. Окуляр 6 служит для получения резкого изображения нити накала лампочки, наблюдаемой через красный светофильтр 5 глазом 7 оператора.

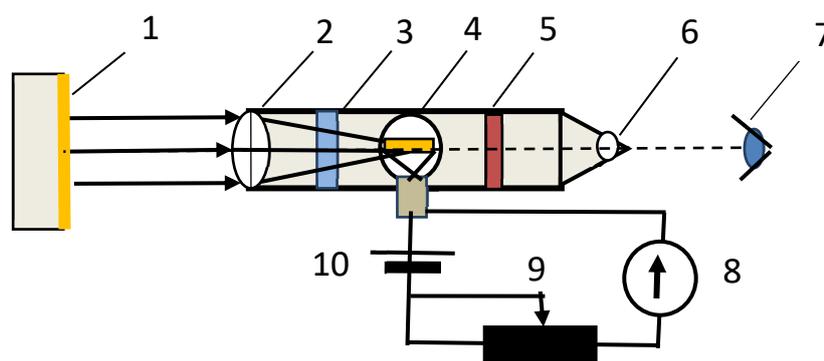


Рис. 13. Устройство и принцип действия яркостного монохроматического пирометра:

1 – объект; 2 – объектив; 3 – поглощающий светофильтр; 4 – пирометрическая лампочка; 5 – красный светофильтр; 6 – окуляр; 7 – глаз; 8 – миллиамперметр; 9 – регулятор тока; 10 – источник питания

Электрическая цепь пирометра состоит из источника питания 10, измерителя тока 8, протекающего через лампу, температура нити накала которой регулируется переменным резистором 9.

Пирометрическая лампочка выполняет функцию встроенного эталонносителя температурной шкалы. При выпуске пирометра из производства устанавливают зависимость проходящего тока, а соответственно, яркости нити накала лампочки от температуры. Устанавливая ток в нити накала, оператор тем самым задает значение ее температуры. Это значение можно найти по зависимости тока от температуры, используя показания измерителя тока, или по шкале переменного резистора, градуированного в градусах Цельсия (°С). Подгоняя регулировкой тока яркость лампочки до яркости объекта, оператор находит искомое значение температуры объекта.

Для расширения диапазона измеряемых температур в область высоких значений используют поглощающий светофильтр 3, который обеспечивает безопасную для перегрева пирометрической лампочки температуру (обычно менее 1 400 °С), а для зрения оператора – приемлемую яркость объекта. При этом используют уже другую зависимость тока в лампочке от температуры (яркости) объекта. Яркостные пирометры обычно используют для измерений температуры в диапазоне от 400 до 6 000 °С и выше. Их погрешность составляет не менее 0,5 °С.

Другой распространенной разновидностью бесконтактных средств термометрии являются *термометры (пирометры) полного или частичного излучения* [17]. Такие пирометры часто называют радиационными. В отличие от яркостных пирометров, использующих, как правило, одну длину волны в спектре теплового излучения нагретых тел, термометры полного или частичного излучения используют энергию практически всего спектра теплового излучения объекта или наиболее интенсивной его части. Устройство таких пирометров представлено на рис. 14.

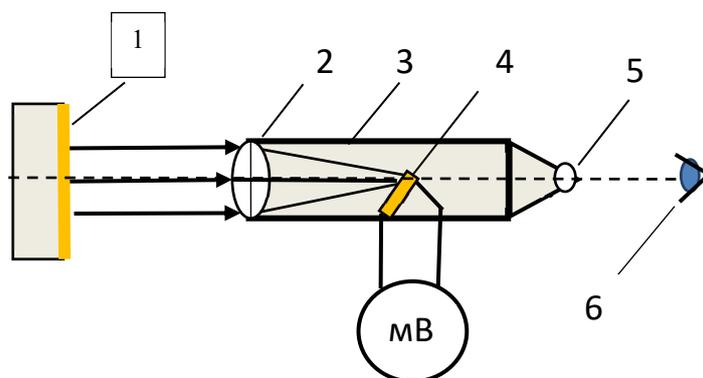


Рис. 14. Устройство и принцип действия традиционного радиационного пирометра:

1 – объект; 2 – объектив; 3 – корпус; 4 – термопара;  
5 – окуляр; 6 – глаз наблюдателя

Объект измерения 1 излучает тепловой поток плотностью  $q$ , который в соответствии с законом Стефана – Больцмана пропорционален четвертой степени абсолютной температуры объекта. Объектив 2, установленный в передней части корпуса 3, концентрирует излучение объекта на чувствительном элементе 3, которым может служить спай термопары 4. Чем выше

температура объекта, тем выше плотность потока теплового излучения с его поверхности, и тем сильнее нагревается спай термопары. Ее сигнал измеряют милливольтметром, который может быть отградуирован в значениях температуры. Окуляр 4 служит наблюдателю 5 для наведения пирометра на объект.

Особенность радиационных термометров заключается в том, что изначально зависимость их показаний от температуры устанавливается с использованием специальных тепловых излучателей, называемых моделями *абсолютно черного тела* (АЧТ). В идеальном случае они представляют собой тело с изотермической полостью с отверстием, площадь которого значительно меньше, чем у поверхности полости. Главное свойство таких излучателей: при одинаковой температуре они имеют максимально возможную яркость отверстия и плотность выходящего из него потока теплового излучения по сравнению с любыми другими телами и поверхностями. Близость интенсивности теплового излучения реальных объектов к свойствам АЧТ характеризуют отношением их яркостей и плотностей потока излучения. Это отношение называют коэффициентом черноты излучения объектов. Принимая коэффициент черноты АЧТ равным единице, получают его значения для реальных излучателей в диапазоне от 0 до 1,0. Измеренную яркостным термометром температуру без учета коэффициента черноты условно называют яркостной, а измеренную термометром полного или частичного излучения – радиационной температурой. Современные радиационные термометры снабжают специальным корректором показаний, позволяющим учитывать известное или ожидаемое значение коэффициента черноты объекта. Таким образом, главным недостатком бесконтактных термометров является зависимость их показаний от надежности данных по значению коэффициента черноты объекта, которое сильно зависит от физико-химических свойств и конфигурации его поверхности. Полученные при этом значения температуры могут значительно отличаться от действительной температуры объекта [18].

Современные пирометры частично решают проблему учета коэффициента черноты (рис. 15). Пирометр ПД-9-01 снабжен лазерным целеуказателем и позволяет измерять температуру объектов в двух диапазонах: от 200 до 400 °С и от 200 до 1 400 °С с погрешностями  $\pm 5$  °С и  $\pm 10$  °С соответственно.



Рис. 15. Пирометр частичного излучения типа ПД-9-01

Прибор оснащен десятиразрядным ЖК-индикатором для настройки прибора и отображения измеренного значения температуры с разрешением  $0,01\text{ }^{\circ}\text{C}$ . В настройках пирометра доступен выбор коэффициента черноты объекта с шагом  $0,001$  в диапазоне от  $0,1$  до  $1,0$ .

Основными преимуществами радиационных термометров являются: отсутствие механического контакта с объектом измерений, самый широкий из всех термометров диапазон измерений и высокое быстродействие.

#### 4. ЭТАЛОНЫ И ПОВЕРОЧНАЯ СХЕМА ДЛЯ СРЕДСТВ ТЕРМОМЕТРИИ

Порядок передачи единицы температуры от государственного первичного эталона средствам измерений определяет государственная поверочная схема (ГОСТ 8.558–2012) [19]. Эта поверочная схема является межгосударственной (для стран СНГ) и введена в действие с июля 2012 г. Схема состоит из трех частей, которые распространяются на контактные термометры в диапазоне от 0,3 до 273,16 К (от минус 272,85 до 0,01 °С), контактные термометры от 273,15 до 3 273,15 К (от 0 до 3 000 °С) и на радиационные термометры от 220 до 100 273,15 К (от минус 53,15 до 100 000 °С). Возглавляет поверочную схему первичный эталон, который состоит из двух комплексов: низкотемпературного (ГПЭ-I) и средне-высокотемпературного (ГПЭ-II). Эталон воспроизводит температурную шкалу в соответствии с МТШ-90 и передает единицу температуры эталонам-копиям, эталонам 0, 1, 2-го и 3-го разрядов, а затем – средствам измерений температуры. Таким образом, осуществляется прослеживаемость передачи единицы температуры от первичного эталона средствам измерений.

Эталонный комплекс ГПЭ-I включает в себя установки для реализации низкотемпературных реперных точек МТШ-90 (рис. 16), интерполяционный газовый термометр, криостаты сравнения для реализации метода непосредственного сличения, прецизионные средства измерений сопротивления и давления. На границах диапазона воспроизводимых значений температуры (0,3 и 273,16 К) комплекс обеспечивает среднее квадратическое отклонение результата измерений ( $n = 5, P = 0,99$ ) от 0,3 до 1 мК (0,001 К) при неисключенной систематической погрешности, которую для первичных эталонов устанавливают расчетом на основе теоретического анализа ее возможных источников, от 0,2 до 0,9 мК. Пределы допускаемой абсолютной погрешности низкотемпературных средств измерений при этом составляют от 5 мК до 5 К.

Эталонный комплекс ГПЭ – II включает в себя установки для реализации средне- и высокотемпературных реперных точек МТШ – 90, набор пла-

тиновых термопреобразователей, термостаты сравнения, прецизионные средства измерений сопротивления и давления, а также средства воспроизведения, хранения и передачи единицы температуры бесконтактными методами. На границах диапазона воспроизводимых значений температуры ( $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  и  $961,78\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) комплекс обеспечивает среднее квадратическое отклонение результата измерений ( $n = 5, P = 0,99$ ) от  $0,03$  до  $1,2\text{ мК}$  при неисключенной систематической погрешности от  $0,04$  до  $1,7\text{ мК}$ .

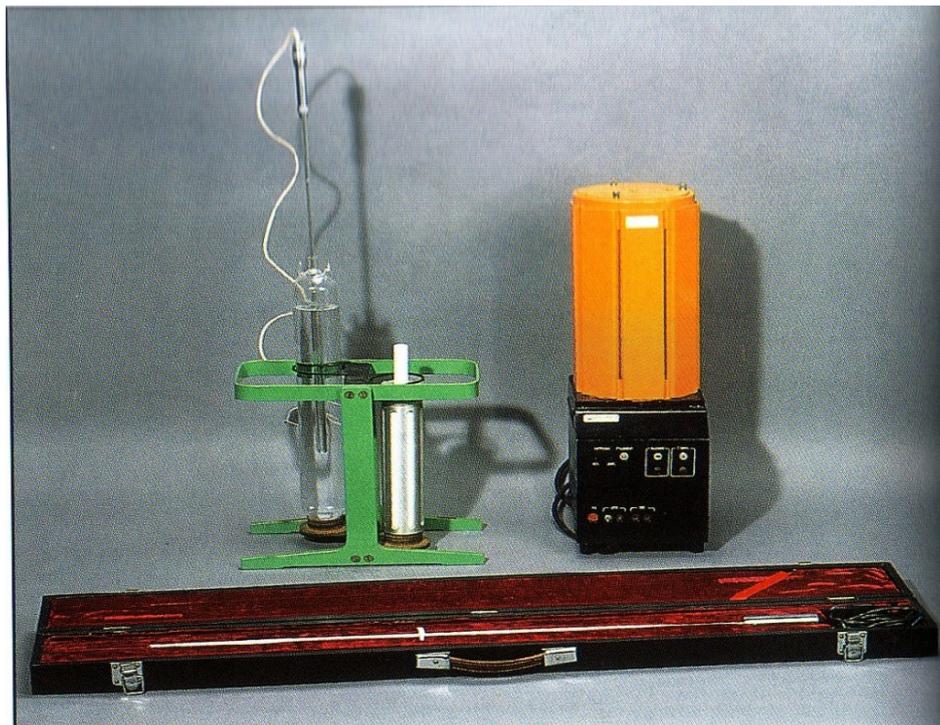


Рис. 16. Ампула ТТВ ( $\text{H}_2\text{O}$ ) с термометром, ампула с галлием, печь для реализации реперных точек металлов

Реперные точки плавления-затвердевания металлов реализуют в кварцевых ампулах *1* (рис. 17), внутри которых находится тигель *2* с крышкой *5* из графита. Внутри тигля расположена пробирка *4* из кварцевого стекла, выполняющая функцию термометрического канала *б*, в который устанавливают исследуемый преобразователь температуры. Между пробиркой и внутренней стенкой тигля находится чистый металл *3*.

Ампулу *5* устанавливают в центральную часть керамической трубы *2*, снабженную тремя нагревателями (*1*, *3* и *б*) и помещенную в теплоизолированный корпус *4*. Температуру центральной части печи задают и поддер-

живают постоянной с помощью автоматического регулятора 13, который управляет мощностью нагревателя 3 по сигналу термопары 9. Температуру верхней и нижней зон печи поддерживают равной температуре центральной части печи. Это равенство обеспечивают автоматические регуляторы температуры 12 и 14, которые управляют мощностью охранных нагревателей по сигналу дифференциальных термопар 8, 9 и 10, 11. При их нулевом сигнале температура верхних и нижних зон печи равна температуре ее центральной части. Этим достигается однородность температурного поля печи. В таких условиях длительность фазового перехода составляет несколько часов. Для получения площадки плавления устанавливают температуру печи несколько выше температуры плавления, а для площадки затвердевания – несколько ниже температуры кристаллизации.

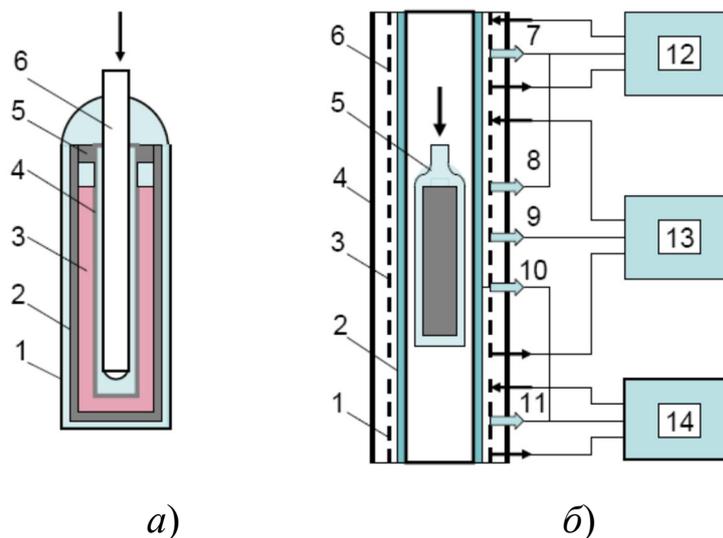


Рис. 17. Воспроизведение реперных точек:

а) ампула реперной точки плавления-затвердевания металлов: 1 – кварцевая ампула; 2 – графитовый тигель; 3 – чистый металл; 4 – кварцевая пробирка; 5 – графитовая крышка; 6 – термометрический канал; б) печь для воспроизведения реперной точки: 1 – нижний охранный нагреватель; 2 – керамическая труба; 3 – центральный нагреватель; 4 – теплоизолированный корпус; 5 – ампула реперной точки; 6 – верхний охранный нагреватель; 7, 8 – верхняя дифференциальная термопара; 9 – центральная термопара; 10, 11 – нижняя дифференциальная термопара; 12 – регулятор температуры верхнего нагревателя; 13 – регулятор температуры центрального нагревателя; 14 – регулятор температуры нижнего нагревателя

Передачу единицы контактными средствами термометрии выше температуры реперной точки затвердевания серебра ( $961,78\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) осуществляют с помощью моделей АЧТ и температурных ламп, а на более низких ступенях поверочной схемы – с помощью высокотемпературных реперных точек и эталонных термоэлектрических преобразователей (рис. 18).

Передачу единицы эталонным средствам радиационной термометрии осуществляют с помощью специального компаратора яркости, основанного на уравнивании яркости эталонного АЧТ и калибруемых АЧТ, или температурной лампы из состава вторичных эталонов. При этом вторичным эталонам приписывают температуру АЧТ.

На верхней границе диапазона передаваемых значений температуры вторичный эталон температуры обеспечивает среднее квадратическое отклонение результата его сличений с первичным эталоном, равное  $0,5\text{ K}$ .

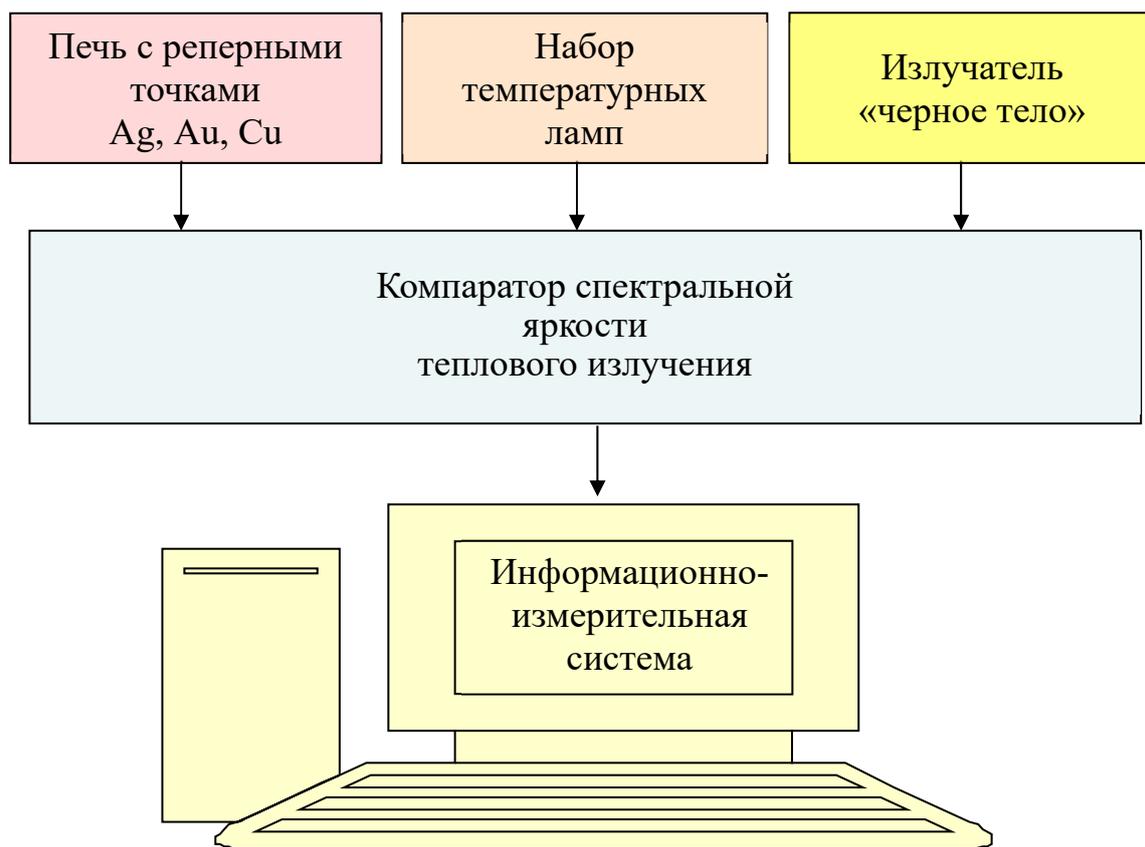


Рис. 18. Состав первичного эталона для температур свыше  $961,78\text{ }^{\circ}\text{C}$

Эталон 2-го разряда при температуре  $2\ 500\text{ }^{\circ}\text{C}$  обеспечивает доверительную погрешность ( $P = 0,95$ ), равную  $10\text{ K}$ . Пределы допускаемой погрешно-

сти контактных средств термометрии, обеспечиваемых эталонным комплек- сом ГПЭ-II, составляют от 3 мК при 0 °С до 30 К при 3 000 °С (рис. 19).

Поверочная схема для средств измерений температуры предусматри- вает возможность передачи единицы двумя методами: методом прямых изме- рений и методом непосредственного сличения. Метод прямых измере- ний основан на использовании эталонных источников с известной и ста- бильной температурой. В качестве таких источников используют однознач- ные и многозначные меры температуры. *Однозначными мерами темпера- туры* являются устройства, реализующие фазовые переходы чистых ве- ществ в ампулах реперных точек.

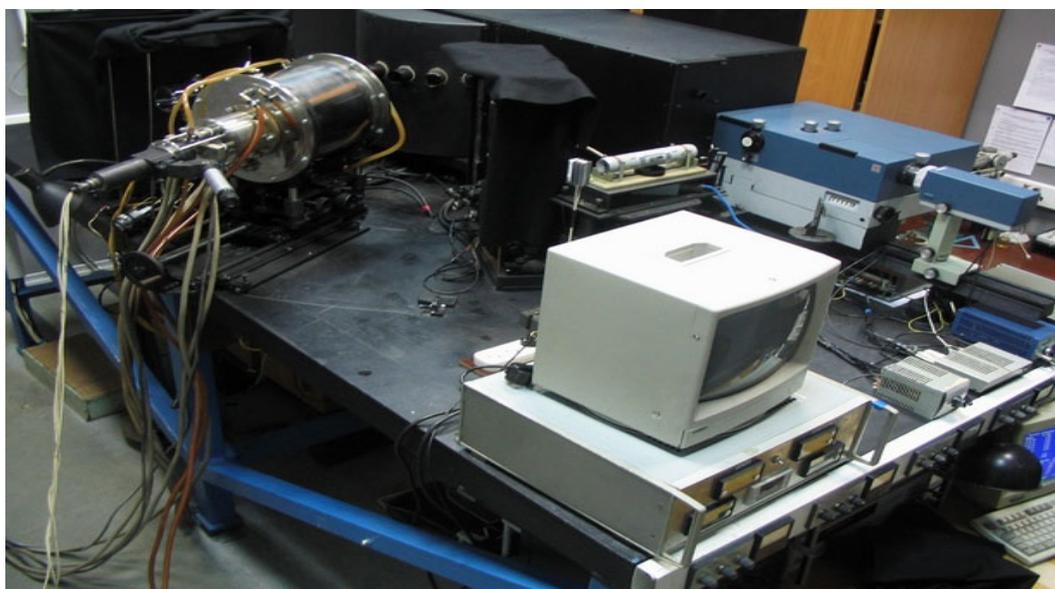


Рис. 19. Первичный эталон для радиационной термометрии

*Многозначными мерами* являются калибраторы температуры. Это устройства, в которых с помощью встроенных в них эталонных термомет- ров путем автоматического регулирования задают значение необходимой температуры и поддерживают его постоянным в течение времени, доста- точного для поверки термометров. Значения задаваемой температуры в этом случае могут быть различными. Поэтому калибратор относят к мно- гозначным мерам температуры, значения которой могут быть заданы про- извольно. При передаче единицы методом прямых измерений поверяемый или аттестуемый термометр погружают в ампулу реперной точки или в из- мерительный блок калибратора.

Калибраторы температуры обычно используют в диапазоне от 50 до 600 °С в качестве многозначных мер температуры 2-го и 3-го разрядов (рис. 20). Погрешность значений температуры, воспроизводимых калибраторами, составляет от одной до нескольких сотых градуса Цельсия.

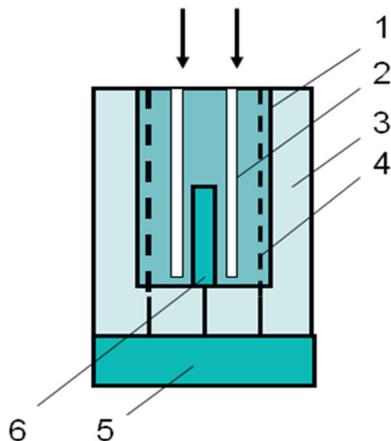


Рис. 20. Устройство калибратора температуры:

- 1 – измерительный блок; 2 – термометрические каналы;  
 3 – теплоизоляция; 4 – нагреватель; 5 – блок измерений и регулирования;  
 6 – эталонный термометр

Поверяемые термопреобразователи помещаются в термометрические каналы 2 измерительного блока 1, окруженного теплоизоляцией 3 для получения однородного температурного поля. Блок измерений и регулирования 5 содержит автоматический регулятор температуры. Цифровой индикатор служит для задания и отображения воспроизводимой калибратором температуры. Регулятор температуры управляет мощностью нагревателя 4 по сигналам вторичного измерительного преобразователя эталонного термометра 6.

В качестве примера ниже приведены технические характеристики калибратора КТ-500 (рис. 21). Калибраторы температуры КТ-500 (далее КТ-500) предназначены для воспроизведения температуры в диапазоне от 50 до 500 °С и реализации реперных точек затвердевания индия, олова и цинка. Их используют в качестве рабочих эталонов (поверочных установок) при поверке и калибровке термометров.

Калибраторы температуры КТ-500 имеют две модификации – КТ-500/М1 и КТ-500/М2, отличающиеся функциональными возможно-

стями: тепловой блок КТ-500/М1 снабжен набором отверстий для установки термометров, а КТ-500/М2, помимо этого, – центральным отверстием для размещения в нем внешнего эталонного термометра или малогабаритной ампулы реперных точек индия, олова или цинка.

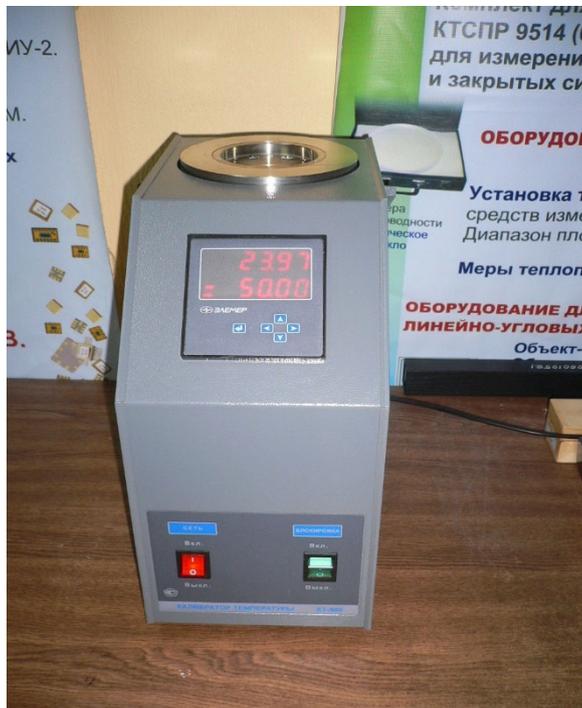


Рис. 21. Калибратор температуры КТ-500

Диапазон воспроизводимых калибратором температур – от 50 до 500 °С. Пределы допускаемой основной погрешности воспроизведения температуры  $t$  для КТ-500/М1 равны  $\pm (0,04 + 0,03t / 100)$  °С. Для КТ-500/М2 пределы допускаемой основной погрешности передачи единицы температуры при использовании дополнительного эталонного термометра в центральной вставке равны  $\pm (0,02 + 0,008t / 100)$  °С. Пределы погрешности воспроизведения температуры в ампулах реперных точек индия  $\pm 0,002$  °С; олова  $\pm 0,003$  °С; цинка  $\pm 0,01$  °С. Нестабильность температуры за 30 мин не превышает  $\pm (0,02 t / 100)$  °С.

При поверке термометры их помещают в каналы калибратора и определяют погрешность по отклонению их показаний от значения температуры, отображаемого на цифровом индикаторе, или от показаний дополнительного эталонного термометра и значения температуры реперных точек.

Сами калибраторы поверяют (аттестуют) с помощью эталонных платиновых термометров более высокого разряда.

В методе непосредственного сличения, предусмотренного поверочной схемой, используют устройства, предназначенные для создания постоянной во времени и однородной в пространстве температуры, значение которой определяется по эталонному термометру. Погрешность поверяемого термометра определяется по отклонению измеренных им значений от показаний эталонного термометра. К устройствам для реализации метода непосредственного сличения относятся постоянные точки температурной шкалы, криостаты, термостаты, печи и модели АЧТ.

Постоянные точки температурной шкалы реализуют при фазовых переходах различных веществ, температура которых в процессе поверки остается постоянной, но ее точное значение неизвестно. Примером таких постоянных точек являются температуры таяния льда и кипения воды. При этих фазовых переходах происходит стабилизация температуры, но ее значение зависит от чистоты воды, а также от давления внешней среды. Поэтому для точного определения ее значения необходимо использовать эталонные термометры. Постоянные температурные точки воды реализуют в нуль-термостатах и в паровых термостатах.

Термостаты – это устройства, предназначенные для создания постоянной во времени и однородной в пространстве температуры, заданное значение которой поддерживается постоянным с помощью регуляторов температуры. При этом опорное значение температуры также необходимо определять с помощью эталонного термометра. Аналогичные по назначению устройства для получения стабильных значений низких температур называют криостатами.

Для создания в термостате (рис. 22) неизменной во времени и однородной в пространстве рабочей камеры  $\delta$  температуры в корпус  $1$  заливают термостатирующую жидкость, которую интенсивно перемешивает мешалка  $2$ . В качестве такой жидкости используют воду (от 0 до 100 °С), спирт (от минус 50 до 30 °С), тосол (от минус 30 до 150 °С), силиконовое (полиметилсилоксановое) масло (от минус 100 до 250 °С), расплавленное олово (от 250 до 650 °С), а для получения более высоких температур – окись алюминия ( $Al_2O_3$ ). Регулятор, расположенный в электронном блоке  $4$ ,

управляет по сигналу контрольного термометра 5 мощностью нагревателя 3, обеспечивая задание и поддержание постоянства необходимого значения температуры. В электронном блоке размещают также двигатель мешалки и вторичный прибор контрольного термометра 5, отображающего задаваемые значения температуры.

В крышке термостата имеются гнезда 6 и 7 для установки эталонного и поверяемых термометров в рабочей камере 8. Эталонный термометр служит для определения точного значения температуры в рабочей камере, которая в общем случае отличается от температуры, задаваемой с помощью контрольного термометра. Теплообменник 9 служит для ускоренного охлаждения термостата и получения в нем низких температур пропусканием по нему хладагента от внешнего источника.

При поверке термометров их устанавливают вместе с эталонным термометром в гнезда термостата и определяют погрешность по отклонению их показаний от значения температуры в рабочей камере, определяемого эталонным термометром.

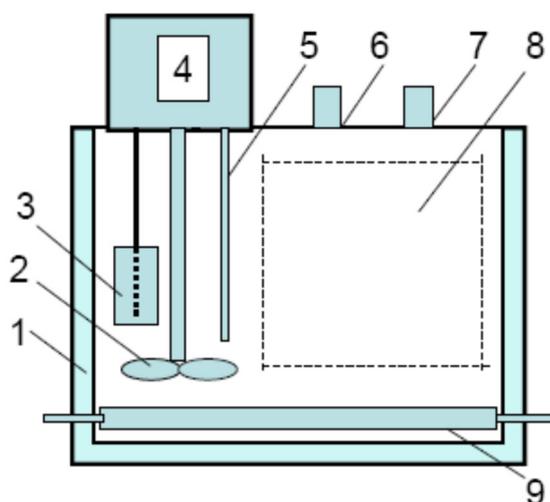


Рис. 22. Схема жидкостного термостата:

- 1 – корпус; 2 – мешалка; 3 – нагреватель; 4 – электронный блок;
- 5 – контрольный термометр; 6 – гнездо для эталонного термометра;
- 7 – гнездо для поверяемых термометров; 8 – рабочая камера;
- 9 – теплообменник

Современные термостаты обеспечивают стабильность и однородность температуры в рабочей камере на уровне нескольких тысячных кельвина.

Их важными эксплуатационными характеристиками являются также объем и глубина рабочей камеры. В качестве примера ниже приведены технические характеристики термостата «Термотест-150» (рис. 23).

Термостат предназначен для поддержания заданной температуры при поверке и калибровке датчиков температуры в диапазоне температуры от 20 до 150 °С. В качестве теплоносителя для указанного диапазона температур рекомендуется использовать силиконовое масло ПМС-20. В диапазоне температур от 20 до 100 °С может быть использована термостатная жидкость ТОСОЛ А-40.

В рабочей камере термостата размером 230 × 280 × 190 мм обеспечивается поддержание заданной температуры с нестабильностью  $\pm 0,02$  °С при неоднородности температурного поля  $\pm 0,02$  °С,



Рис. 23. Термостат «Термотест-150»

При поверке термометров в области более высоких температур (выше 250 °С) метод сличения традиционно реализуют в горизонтальных трубчатых печах (рис. 24) [20].

Эталонный  $\theta$  и поверяемый термометр  $\delta$  устанавливают в каналы выравнивающего блока  $1$ , выполненного из теплопроводного жаропрочного металла или сплава и размещенного в средней части керамической трубы  $3$  печи. Автоматическим регулятором  $5$  осуществляется задание и поддержание необходимого значения температуры печи путем управления мощностью нагревателя по сигналу контрольной термопары  $4$ . По отклонению показаний вторичного прибора  $7$  и поверяемых термометров находят их погрешность.

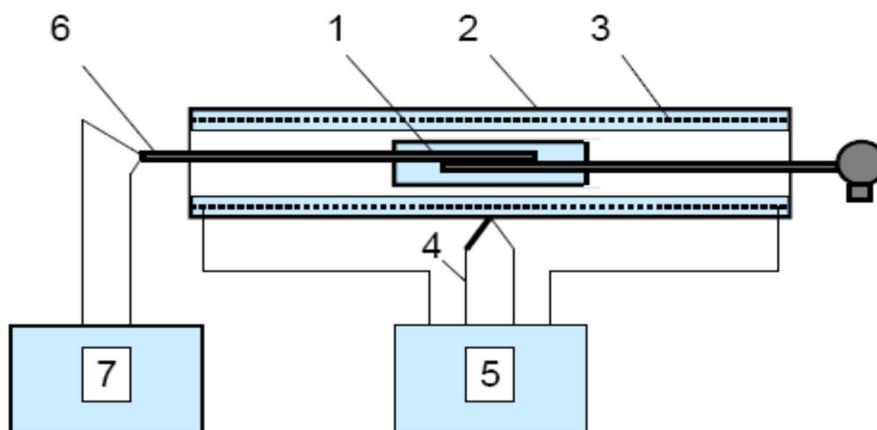


Рис. 24. Горизонтальная поверочная печь:

1 – выравнивающий блок; 2 – теплоизолированный корпус; 3 – керамическая труба с электронагревателем; 4 – контрольная термопара; 5 – регулятор температуры; 6 – эталонный термометр; 7 – вторичный прибор; 8 – поверяемый термометр

Теоретической основой радиационной термометрии являются законы Планка и Стефана – Больцмана, строго описывающие излучение АЧТ.

Тепловые излучатели в виде моделей абсолютно черного тела (рис. 25, 26) и температурные лампы являются универсальным средством передачи единицы температуры в области радиационной термометрии. Идеальной моделью абсолютно черного тела служит нагретая полость с отверстием, площадь которого по сравнению с площадью поверхности излучающей полости пренебрежимо мала.



Рис. 25. Внешний вид АЧТ из состава первичного эталона

Соответствие свойств излучения АЧТ основным законам радиационной термометрии достигается соблюдением требований к однородности и постоянству температуры по всей поверхности излучающей полости.

Для моделей АЧТ, удовлетворяющих этим требованиям и использующихся при поверке, характерна высокая воспроизводимость значения яркости отверстия АЧТ и плотности потока излучения, выходящего из него при заданной температуре.

Коэффициент черноты  $\varepsilon$  равен отношению яркости (плотности потока излучения) реального тела к соответствующим характеристикам излучения АЧТ и определяет степень близости свойств излучения реальных объектов к свойствам АЧТ.



Рис. 26. Калибровка эталонного пирометра по высокотемпературной модели АЧТ, входящей в состав первичного эталона температуры

Коэффициент черноты идеального АЧТ равен единице, у реальных объектов находится в диапазоне от 0 до 1. Например, яркость и поверхностная плотность радиационного теплового потока плоской полированной поверхности алюминия ( $\varepsilon = 0,03$ ) примерно в 33 раза меньше, чем у отверстия в полости, выполненной из того же алюминия ( $\varepsilon \approx 1$ ). В руководствах по эксплуатации пирометров, как правило, приводятся примерные значения

коэффициента черноты различных объектов. Структурная схема модели АЧИ приведена на рис. 27.

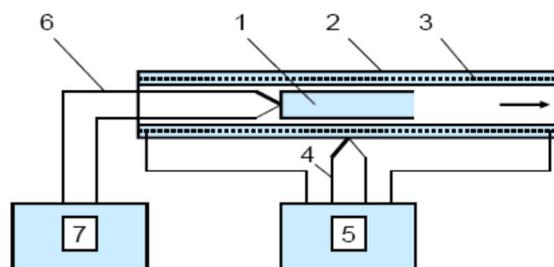


Рис. 27. Модель АЧТ:

1 – излучатель; 2 – теплоизолированный корпус; 3 – керамическая труба с нагревателем; 4 – контрольная термопара; 5 – регулятор температуры; 6 – эталонная термопара; 7 – вторичный прибор

В качестве рабочего разрядного эталона для пирометрии используют излучатель в виде модели абсолютно черного тела АЧТ-45/100/1100, который состоит из трубчатой печи, блока управления и эталонного термоэлектрического термометра.

Трубчатая печь является основной частью излучателя. В рабочее пространство печи установлена цилиндрическая вставка из никеля (рис. 28), содержащая излучающую полость в виде глубокого отверстия. На переднем фланце печи имеется устройство для крепления внешних диафрагм, позволяющее правильно установить оптическую ось и определить показатель визирования калибруемых пирометров. На заднем фланце печи расположен держатель для крепления эталонного термометра при его установке в канал никелевой вставки.



а)

б)

Рис. 28. Излучатель АЧТ-45/100/1100:

а) внешний вид; б) никелевая вставка

Температура печи регулируется с помощью блока управления БУ-1М по сигналу контрольной термопары. Измерения температуры излучающей полости осуществляют эталонным термометром ПП (S), установленным в канале никелевой вставки с ее тыльной стороны.

Технические характеристики АЧТ: диапазон воспроизводимых температур – от 300 до 1 100 °С; время выхода на стационарный режим температуры – не более 120 мин; дрейф температуры в течение 15 мин после выхода на стационарный режим – не более 0,25 °С; погрешность поддержания температуры – не более 0,5 °С; погрешность задания температуры излучателя – не более 0,5 % от установленной температуры; размеры излучающей полости вставки: глубина – 150 мм, диаметр выходного отверстия – от 25 до 50 мм; коэффициент черноты излучающей полости не менее 0,99.

Для калибровки монохроматических яркостных пирометров используют температурные лампы, которые являются многозначными эталонными мерами температуры (рис. 29). Принцип их действия основан на зависимости яркости вольфрамовой ленты от значений протекающего по ней тока. Такие лампы используют при поверке и калибровке яркостных пирометров в диапазоне от 800 до 2 500 °С. Минимальная погрешность значений температуры, воспроизводимых лампами, составляет 0,5 К [21].

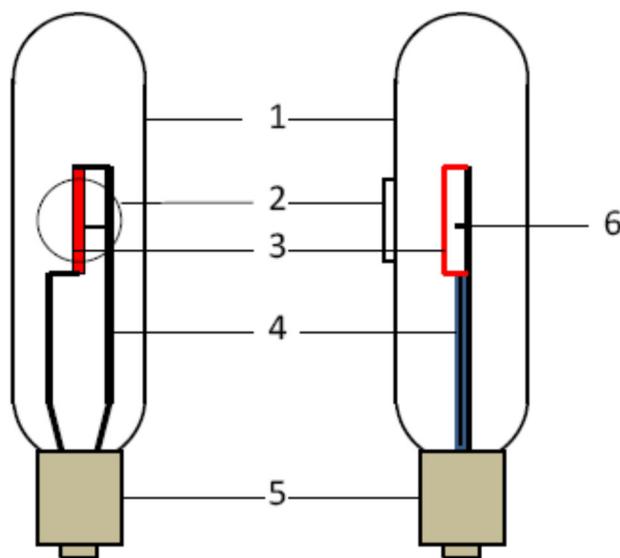


Рис. 29. Температурная лампа:

1 – стеклянная колба; 2 – увиолевое стекло; 3 – вольфрамовая лента;  
4 – электроды; 5 – цоколь; 6 – индекс

Температурная лампа является вакуумной или газонаполненной лампой накаливания и содержит стеклянную колбу 1 с окном 2 из увиолевого стекла, хорошо пропускающего видимую область спектра теплового излучения. Внутри лампы расположено тело накала в виде тонкой вольфрамовой ленты 3. Лента приварена к электродам 4, по которым к ней подводят электрический ток. Рабочий участок ленты, на который визируют пирометры при проверке, отмечен индексом 6 – отрезком тонкой вольфрамовой проволоки, приваренной к одному из электродов. Питание лампы осуществляют постоянным электрическим током, который подводят от стабилизированного источника питания через цоколь 5, соединенный с электродами.

Регулируя ток в лампе, изменяют температуру ленты, а соответственно, и ее яркость. Зависимость температуры ленты от тока определяют при выпуске лампы из производства и периодически в процессе ее аттестации в качестве эталонной меры температуры. Для этого используют модели АЧТ или температурные лампы более высокого разряда, а также компараторы спектральной яркости (рис. 30).

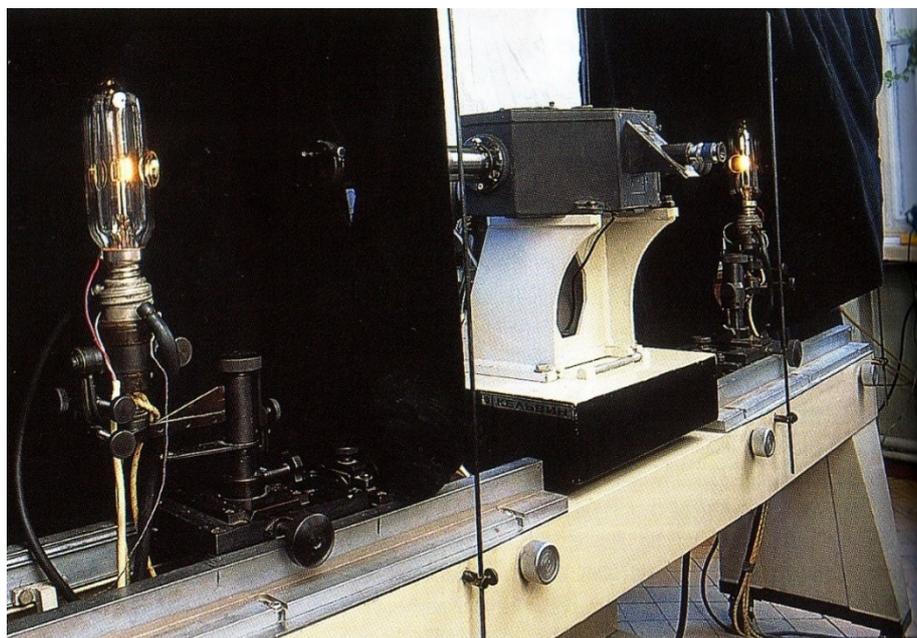


Рис. 30. Калибровка температурных ламп с помощью компаратора спектральной яркости (в затемненном помещении)

Принцип действия компаратора яркости основан на измерениях значения тока в калибруемой эталонной лампе, при котором ее яркость и, соот-

ветственно, температура равны яркости и заданной температуре эталонной разрядной лампы более высокого разряда. Для этого настройкой соответствующих объективов компаратора фокусируют излучение ламп в плоскости поворотного зеркальца, которое, выполняя функцию низкочастотного модулятора, поочередно направляет излучение в монохроматор, а затем в фотоприемник. Монохроматор выделяет необходимую длину волны излучения, при которой требуется аттестовать лампу. Равенство яркости ламп и соответствующее значение тока в калибруемой лампе фиксируют при нулевой амплитуде колебаний выходного сигнала фотоприемника.

Таким образом, можно отметить следующее:

– измерения температуры являются самым востребованным видом не только в области измерений тепловых, но и всех других величин. Действительно, только медицинских термометров, имеющих практически в каждой семье, насчитывается более сотни миллионов;

– в связи с этим уже в самые ближайшие годы все более широко будут внедряться дешевые многофункциональные миниатюрные термометры. Это относится не только к датчикам температуры, но и к вторичным термометрическим приборам. Это приведет к возможности создания малогабаритных, и даже миниатюрных средств воспроизведения и передачи единицы температуры, которые придут на смену громоздким печам, калибраторам и термостатам;

– данные обстоятельства, а также новое определение кельвина и соответствующая модернизация первичных, а следовательно, и вторичных эталонов, приведут к необходимости пересмотра многих нормативных документов в области обеспечения единства измерений температуры.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Требования закона от 26.06.2008 № 102-ФЗ «Об обеспечении единства измерений» предусматривают прослеживаемость измерений, средств измерений и эталонов величин к первичным эталонам этих величин. При отсутствии в нашей стране соответствующих первичных эталонов закон требует обращаться к эталонам других государств. В противном случае результаты измерений, например, при выполнении международных торговых операций и регистрации спортивных рекордов, не могут быть признаны достоверными. Аналогичная ситуация может возникнуть при неудовлетворительных результатах ключевых сличений метрологических характеристик отечественного первичного эталона с национальными эталонами других стран. Данный факт является одной из форм частичной утраты суверенитета страны и, в целом, показателем ее технологического отставания.

В последние 10–15 лет государство достаточно активно финансировало создание новых и обновление уже существующих, наиболее востребованных первичных эталонов. К сожалению, в числе невостребованных и не обновляемых уже более 30 лет оказались низкотемпературные эталоны теплопроводности и теплоемкости. Это косвенно свидетельствует о технологическом отставании страны даже от уровня, достигнутого ранее в СССР, в частности, в области криогенного материаловедения. С учетом возраста этих эталонов, средний возраст приведенных в перечне эталонов оказался значителен и составляет около 15 лет. В настоящее время средний возраст государственных первичных эталонов в стране составляет около 11 лет.

Стратегия обеспечения единства измерений в Российской Федерации до 2025 г. [22] учитывает, что основой обеспечения единства измерений в стране является эталонная база, научно-технический уровень которой должен соответствовать и способствовать темпам развития науки, промышленности, обороны и безопасности государства. В связи с этим стратегия предусматривает, что периодичность обновления национальных эталонов должна быть как у передовых иностранных государств и составлять не менее 5–7 лет. Для повышения эффективности государственных эталонов

единиц величин стратегия рекомендует «при их создании и модернизации, проводимых на основе современных научных подходов и элементной базы, ориентироваться на создание эталонных комплексов, обеспечивающих воспроизведение нескольких единиц различных физических величин и реализацию нескольких схем прослеживаемости (комплексирование)».

Если учесть эту рекомендацию, то следует ожидать, что достижение в будущем такого результата, например, для тепловых величин, будет возможным на основе эталонов единиц только двух таких величин: температуры и плотности теплового потока.

Создание нового поколения эталонов является необходимым условием для создания высокоточных средств измерений и измерительных технологий, без которых невозможно производство наукоемких продуктов и развитие инновационных технологий. В государственной программе Российской Федерации «Развитие промышленности и повышение ее конкурентоспособности» (Постановление правительства РФ от 15.04.2014 № 328) отмечается, что развитие системы обеспечения единства измерений должно увеличить в 3–5 раз точность и расширить диапазоны измерений физических величин. Это позволит успешно решать задачи инновационного развития страны во всех важнейших направлениях науки, техники и технологий, таких как энергетика, электроника, робототехника, новые материалы, информатика, экология и медицина.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Куинн Т. Температура. – М. : Мир, 1985. – 448 с.
2. Геращенко О. А. Температурные измерения : справочник. – Киев : Наукова думка, 1989. – 704 с.
3. Олейник Б. Н., Лаздин В. П., Жагулло О. М. Приборы и методы температурных измерений. – М. : Изд-во стандартов, 1987. – 296 с.
4. Бродников А. Ф., Черепанов В. Я. Поверка и калибровка средств измерений температуры : учеб. пособие для вузов. – Новосибирск : Новосибирский филиал АСМС, 2013. – 114 с.
5. Преображенский В. П. Теплотехнические измерения и приборы : учеб. пособие для вузов. – М. : Энергия, 1978. – 704 с.
6. Линевег Ф. Измерение температуры в технике : справочник. – М. : Metallurgia, 1980. – 543 с.
7. Походун А. И., Шарков А. В. Экспериментальные методы исследований. Измерения теплофизических величин : учеб. пособие для вузов. – СПб. : ГУ ИТМО, 2006. – 87 с.
8. ГОСТ 8.279–78. Термометры стеклянные жидкостные рабочие. Методы и средства поверки. – Введ. 01.01.1979. – М. : Изд-во стандартов, 1985. – 33 с.
9. ГОСТ 8.317–78. Термометры стеклянные ртутные образцовые. Методы и средства поверки. – Введ. 01.07.1979. – М. : Изд-во стандартов, 1979. – 34 с.
10. ГОСТ Р 8.51233–98. Термометры сопротивления платиновые эталонные 1-го и 2-го разрядов. Общие технические требования. – Введ. 22.12.1998. – М. : Госстандарт России, 1998. – 8 с.
11. ГОСТ 8.571–98. Термометры сопротивления платиновые эталонные 1-го и 2-го разрядов. Методика поверки. – Введ. 22.12.1998. – М. : Госстандарт России, 1998. – 21 с.
12. ГОСТ 8.624–2006. Термометры сопротивления из платины, меди и никеля. Методика поверки. – Введ. 01.01.2008. – М. : Стандартинформ, 2007. – 27 с.

13. ГОСТ 6651–2009. Термопреобразователи сопротивления из платины, меди и никеля. Общие технические требования и методы испытаний. – Введ. 10.11.2009. – М. : Стандартинформ, 2009. – 30 с.
14. ГОСТ 8.338–2002. Преобразователи термоэлектрические. Методика поверки. – Введ. 06.11.2002. – Минск : Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 2002. – 27 с.
15. ГОСТ 8.585–2001. Термопары. Номинальные статические характеристики преобразования. – Введ. 01.07.2002. – М. : Стандартинформ, 2010. – 78 с.
16. Гордов А. Н. Основы пирометрии: справочное руководство. – М. : Metallurgia, 1964. – 471 с.
17. МИ 1200–86. Преобразователи первичные пирометрические полного и частичного излучения. Методика поверки. – Введ. 01.01.1987. – М : Изд-во стандартов, 1980. – 16 с.
18. ГОСТ Р 8.619–2006. Приборы тепловизионные измерительные. Методика поверки. – Введ. 01.07.2012. – М. : Стандартинформ, 2007. – 16 с.
19. ГОСТ 8.558–2012. Государственная поверочная схема для средств измерений температуры. – Введ. 01.07.2012. – М. : Стандартинформ, 2012. – 26 с.
20. ГОСТ Р 8.566–96. Излучатели эталонные (образцовые) в виде модели абсолютно черного тела для диапазона от минус 50 до плюс 2 500 °С. Методика аттестации и поверки. – Введ. 01.07.1997. – М. : Изд-во стандартов, 1997. – 216 с.
21. ГОСТ Р 8.790–2012 Государственная система обеспечения единства измерений. Лампы температурные. Методика поверки и калибровки. – Введ. 01.01.2011. – М. : Стандартинформ, 2012. – 22 с.
22. Об утверждении стратегии обеспечения единства измерений в Российской Федерации до 2025 года [Электронный ресурс] : распоряжение правительства РФ от 19.04.2017 № 737-Р. – Режим доступа: [docs.cntd.ru/document/420397087](https://docs.cntd.ru/document/420397087).

*Учебное издание*

**Вихарева** Надежда Анатольевна

**Бродников** Александр Федорович

**Достовалов** Николай Николаевич

**МЕТРОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ  
ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ  
ОСНОВЫ ТЕРМОМЕТРИИ**

Редактор *Е. Н. Ученова*

Компьютерная верстка *О. И. Голиков*

Изд. лиц. ЛР № 020461 от 04.03.1997.

Подписано в печать 30.12.2020. Формат 60 × 84 1/16.

Усл. печ. л. 2,96. Тираж 80 экз. Заказ 174.

Гигиеническое заключение

№ 54.НК.05.953.П.000147.12.02. от 10.12.2002.

Редакционно-издательский отдел СГУГиТ  
630108, Новосибирск, ул. Плахотного, 10.

Отпечатано в картопечатной лаборатории СГУГиТ  
630108, Новосибирск, ул. Плахотного, 8.