

А.Ф. Бродников, Н.А. Вихарева

Поверка и калибровка средств измерений температуры

УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ

Новосибирск

2021

УДК 621.1:006(075.8)

ББК 31.32-5я73

Б88

Бродников, Александр Федорович, Вихарева, Надежда Анатольевна.

Б88 Поверка и калибровка средств измерений температуры. / А. Ф. Бродников, Н. А. Вихарева. – Новосибирск: Агентство «Сибпринт», 2021. – 134 с.

ISBN 978-5-94301-854-1

Рассмотрены основные положения законодательной метрологии по вопросам поверки и калибровки средств измерений. Приведены сведения по теоретическим основам термометрии. Рассмотрены методы и средства современной термометрии, а также необходимые сведения по методам и средствам метрологического обеспечения средств измерений температуры. При этом первостепенное внимание уделено методам экспериментального определения их действительных метрологических характеристик.

Приведены основные технические и метрологические характеристики средств поверки контактных и радиационных термометров.

Учебное пособие написано на основе курса лекций и практических занятий, читаемых и проводимых авторами для слушателей Новосибирского филиала Академии стандартизации, метрологии и сертификации, повышающих квалификацию по специализации «Поверка и калибровка средств теплотехнических измерений» на кафедре «Теплотехнические и физико-химические измерения».

Материал пособия может быть полезен специалистам в области метрологического обеспечения и эксплуатации средств измерений температуры, а также студентам теплоэнергетических и приборостроительных специальностей различных учебных заведений.

Авторы: канд. техн. наук, доцент *Бродников Александр Федорович*, канд. техн. наук, доцент *Вихарева Надежда Анатольевна*.

УДК 621.1:006(075.8)

ББК 31.32-5я73

ISBN 978-5-94301-854-1

© Бродников А. Ф., 2021

© Вихарева Н. А., 2021

© НФ АСМС, 2021

Содержание

Введение.....	5
1 Основные положения законодательной метрологии о поверке и калибровке средств измерений.....	6
1.1 Общие сведения об измерениях, обеспечении их единства и достоверности.....	6
1.2 Государственное регулирование обеспечения единства измерений.....	14
1.3 Поверка и калибровка средств измерений.....	17
2 Основы термометрии.....	23
2.1 Температура и фазовые переходы.....	23
2.2 Условные шкалы и единицы температуры.....	24
2.3 Газовая термометрия и абсолютная температурная шкала.....	27
2.4 Температура таяния льда и тройной точки воды.....	33
2.5 Термометрические свойства и классификация термометров.....	35
2.6 Международная температурная шкала.....	38
2.7 Новый Российский мировой эталон температуры.....	45
3 Контактная термометрия.....	48
3.1 Жидкостные стеклянные термометры.....	48
3.2 Манометрические термометры.....	52
3.3 Термометры сопротивления.....	55
3.4 Термоэлектрические термометры.....	61
3.5 Вторичные термометрические приборы.....	65
4 Радиационная термометрия.....	76
4.1 Основы теории.....	76
4.2 Яркостные термометры (пирометры).....	77
4.3 Радиационные термометры полного и частичного излучения.....	78
5 Поверка средств термометрии.....	81
5.1 Государственная поверочная схема для средств измерений температуры.....	81

5.2 Методы и средства поверки.....	84
5.3 Поверка жидкостных стеклянных и манометрических термометров..	91
5.4 Поверка термопреобразователей сопротивления.....	94
5.5 Поверка термоэлектрических преобразователей.....	96
5.6 Поверка вторичных термометрических приборов.....	98
5.7 Поверка радиационных термометров.....	101
Библиография.....	104
Приложение А (К истории термометрии)	107
Приложение Б (Милливольтметр В2-99)	110
Приложение В (Преобразователь сигналов ТС и ТП прецизионный «ТЕРКОН»)	114
Приложение Г (Термостат «Термотест-150»)	118
Приложение Д (Калибратор температуры эталонный КТ-500)	121
Приложение Е (Излучатель АЧТ – 45/100/1100)	125
Приложение Ж (Имитатор сигналов комбинированные ИСК-1)	127
Приложение И (Магазин сопротивлений Р4831)	131

Введение

Теплотехнические измерения являются одной из наиболее распространенных областей измерений. Они охватывают измерения таких важнейших, прежде всего, для теплоэнергетики и энергосбережения, физических величин, как температура, давление и расход. В частности, на основе измерений этих величин осуществляется коммерческий учёт тепла и количества теплоносителя в системах теплоснабжения. Поэтому во многих случаях использования теплотехнических измерений распространяются требования государственного регулирования обеспечения единства измерений.

Одним из видов государственного регулирования обеспечения единства измерений является поверка средств измерений. Поверка – это совокупность операций по экспериментальному определению действительных метрологических характеристик средств измерений и по подтверждению их соответствия установленным метрологическим требованиям.

Учебное пособие написано на основе курса лекций и практических занятий, читаемых и проводимых авторами для слушателей Новосибирского филиала Академии стандартизации, метрологии и сертификации, повышающих квалификацию по специализации «Поверка и калибровка средств теплотехнических измерений» на кафедре «Теплотехнические и физико-химические измерения».

Материал пособия может быть полезен специалистам в области метрологического обеспечения и эксплуатации средств измерений температуры, а также студентам теплоэнергетических и приборостроительных специальностей различных учебных заведений.

Когда я начинаю рассказывать студентам про измерения и средства измерений, то обычно использую следующие вступление: «Измерения – это единственный способ получения достоверной и объективной информации о процессах и явлениях. Технические средства, предназначенные для измерений, называют средствами измерений. К таким средствам относятся, например, меры, измерительные приборы, измерительные установки, а также информационно-измерительные системы»

В.Я. Черепанов

1 Основные положения законодательной метрологии о поверке и калибровке средств

1.1 Общие сведения об измерениях, обеспечении их единства и достоверности

Известно, что метрология – это наука об *измерениях*, методах и средствах *обеспечения их единства и достоверности* получаемых результатов. *Измерение* – это совокупность операций, выполняемых с помощью специальных технических средств, с целью определения значения величины. Технические средства, предназначенные для измерений, называют *средствами измерений*. Результатом измерений является количественная оценка величины в виде её *значения*, которое содержит число и указание на единицу измерения, характеризующую измеряемую величину. Например, результат измерений напряжения в сети переменного тока составляет 220 В (вольт). Здесь число 220 показывает, сколько единиц электрического напряжения (В) содержится в измеряемой физической величине.

Государственная система обеспечения единства измерений – это система обеспечения единства измерений в стране, реализуемая, управляемая и контролируемая федеральным органом исполнительной власти по метрологии – Федеральным агентством по техническому регулированию и метрологии (Росстандарт).

Деятельность по обеспечению единства измерения направлена на охрану прав и законных интересов граждан, установленного правопорядка и экономики путем защиты от отрицательных последствий недостоверных результатов измерений во всех сферах жизни общества на основе конституционных норм, законов, постановлений Правительства РФ и нормативных документов (НД).

Обеспечение единства измерений в стране осуществляется:

- на государственном уровне;
- на уровне федеральных органов исполнительной власти;
- на уровне юридических лиц.

Цель государственной системы обеспечения единства измерений – создание общегосударственных правовых, нормативных, организационных, технических и экономических условий для решения задач по обеспечению единства измерений и предоставление всем субъектам деятельности возможности оценивать правильность выполняемых измерений.

Обеспечение единства измерений – это комплекс нормативно-правовых, организационных и научно-технических мероприятий, направленных на достижение такого состояния измерений, при котором результаты измерений одной и той же величины, полученные разными методами и средствами, в разных местах и в разное время совпадают в пределах установленных показателей точности.

К *нормативно-правовой* (законодательной) составляющей обеспечения единства измерений в России (рисунок 1.1) относятся:

- Конституция РФ Конституцией РФ (пункт "р" статьи 71) установлено, что в ведении Российской Федерации находятся стандарты, эталоны, метрическая система и исчисление времени.

- Федеральный закон № 102-ФЗ от 26.06.2008 «Об обеспечении единства измерений». Федеральным законом определены виды экономической деятельности РФ, измерения, осуществления которых попадает в сферу

госрегулирования и на них распространяются установленные обязательные требования.

- Другие федеральные законы и подзаконные акты, регулирующие деятельность в сфере государственного регулирования (постановления правительства, правила по метрологии (ПР), национальные стандарты (ГОСТ Р), межгосударственные (в рамках СНГ) стандарты (ГОСТ) и рекомендации (РМГ), рекомендации научных метрологических институтов (МИ) и другие нормативные документы в области обеспечения единства измерений).



Рисунок 1.1 – Законодательная структура ГСИ РФ

Организационную составляющую обеспечения в стране единства измерений образуют государственная метрологическая служба, метрологические службы федеральных органов исполнительной власти, юридических лиц и предпринимателей. Вся метрологическая деятельность в РФ, в том числе и обеспечение единства измерений, основывается на конституционной норме, в развитие которой приняты законы «Об обеспечении единства измерений», «О техническом регулировании», детализирующие основы метрологической деятельности и способствующие международному сотрудничеству (рисунок 1.2).

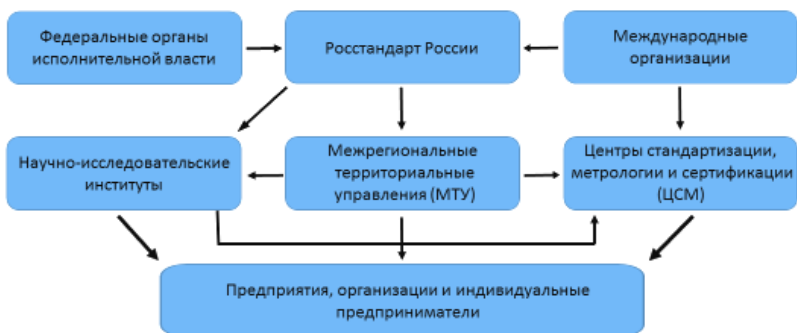


Рисунок 1.2 – Организационная структура ГСИ РФ

В настоящее время государственную политику и нормативно-правовое регулирование в области обеспечения единства измерений, а также оказание услуг и управление государственным имуществом в этой области осуществляют в Министерство промышленности и торговли (Минпромторг) и Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии (с 2004 до 2010 года – Ростехрегулирование, сейчас – Росстандарт). Росстандарт осуществляет руководство государственными научно-исследовательскими институтами и государственными региональными центрами метрологии, а также Государственной службой времени, частоты и определения параметров вращения Земли (ГСВЧ и ОПВЗ); Государственной службой стандартных справочных данных (ГСССД) и Государственной службой стандартных образцов (ГССО).

В состав Государственной метрологической службы входят следующие научно-исследовательские институты:

- ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт метрологической службы» (ВНИИМС, г. Москва);

- ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии имени Д.И. Менделеева» (ВНИИМ, г. С.-Петербург);

- ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт расходомерии – филиал федерального государственного унитарного предприятия «Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии им. Д.И. Менделеева» (ВНИИР, г. Казань);

- ФГУП «Уральский научно-исследовательский институт метрологии – филиал федерального государственного унитарного предприятия «Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии им. Д.И. Менделеева» (УНИИМ, г. Екатеринбург);

- ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт оптико-физических измерений» (ВНИИОФИ, г. Москва);

- ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений» (ВНИИФТРИ, Московская обл. рабочий посёлок Менделеево, городской округ Солнечногорск);

- ФГУП Западно-Сибирский филиал «ВНИИФТРИ» (г. Новосибирск);

- ФГУП Восточно-Сибирский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений (ВС ВНИИФТРИ, г. Иркутск);

- ФГУП ВНИИФТИ «Дальстандарт» (г. Хабаровск).

Иркутский и Хабаровский филиалы, вошли в 2007 г. в состав ФГУП «ВНИИФТРИ», Новосибирский филиал вошел в состав ВНИИФТРИ в 2020 году.

Научно-исследовательские институты Росстандарта несут ответственность за создание, совершенствование, хранение и применение государственных эталонов, а также за разработку нормативных документов по обеспечению единства измерений. Они являются хранителями государственных эталонов, ведут исследования в области теории измерений, принципов и методов высокоточных измерений, разработки научно-методических основ совершенствования российской системы измерений.

Органами Государственной метрологической службы являются центры стандартизации, метрологии и сертификации (ЦСМ), расположенные по всей территории России. Крупнейшими из них являются ФГУ «Ростест-Москва» и ФГУ «Тест-Санкт-Петербург». Приоритетным направлением деятельности Государственных региональных центров стандартизации, метрологии и испытаний (ФБУ ЦСМ) являются: осуществление поверки средств измерений.

Кроме того, в области обеспечения единства измерений, научно-исследовательские институты Росстандарта и ФБУ ЦСМ выполняют платные работы и оказывают платные услуги юридическим и физическим лицам, включая:

- калибровку и поверку средств измерений, аттестацию испытательного оборудования;
 - испытания средств измерений с целью утверждения их типа,
 - аттестацию методик выполнения измерений, оценку состояния измерений в испытательных и измерительных лабораториях.
 - проведение испытаний для целей государственного надзора
- Дополнительно ЦСМ осуществляют
- проведение межлабораторных сравнительных испытаний продукции;
 - проведение исследований (испытаний) продукции;
 - ремонт средств измерений, изготовление эталонов и стандартных образцов, проведение судебных экспертиз и др.

Для целей обеспечения единства измерений созданы и другие государственные службы: Государственная служба времени и частоты и определения параметров Земли (ГСВЧ), Государственная служба стандартных образцов состава и свойств веществ и материалов (ГССО), Государственная служба стандартных справочных данных о физических константах и свойствах веществ и материалов (ГСССД).

Метрологические службы органов государственного управления и юридических лиц создаются для выполнения работ по соблюдению единства

измерений, повышения уровня метрологического обеспечения. Допускается возложение отдельных функций метрологической службы на иные структурные подразделения. Метрологические службы органов государственного управления и юридических лиц организуют свою деятельность на основе положений Закона «Об обеспечении единства измерений», других законодательных и нормативных документов, регламентирующих вопросы метрологии. Основные задачи, права и обязанности метрологических служб органов государственного управления и юридических лиц независимо от форм собственности последних определены в документе ПР 50.732-93 «Типовое положение о метрологической службе государственных органов управления и юридических лиц».

Метрологическая служба органа государственного управления представляет собой систему, образуемую приказом его руководителя, и может включать: подразделение (службу) главного метролога в центральном аппарате; головные и базовые организации метрологической службы в отраслях; метрологические службы предприятий.

Метрологическая служба юридического лица (ранее применялся термин метрологическая служба предприятия) выполняет работы по обеспечению единства измерений и осуществляющая метрологический контроль и надзор на данном предприятии (в организации).

К основным задачам метрологических служб относятся:

- поверка и калибровка средств измерения;
- надзор за состоянием и применением средств измерения, за аттестованными методиками выполнения измерений и эталонами единиц величин, применяемыми для калибровки средств измерения, за соблюдением метрологических правил и норм, и нормативных документов по обеспечению единства измерений;
- выдача обязательных предписаний, направленных на предотвращение, прекращение или устранение нарушений метрологических правил и норм;

- проверка своевременности представления средств измерения на испытания для утверждения типа, а также на поверку и калибровку;
- анализ состояния измерений, испытаний и контроля на предприятии.

Научно-техническая составляющая обеспечения единства измерений – это фундаментальные и прикладные исследования по совершенствованию и созданию эталонов единиц измерений, методов и средств их передачи средствам измерений; по развитию теоретических основ оценки достоверности результатов измерений. Материальной основой этой составляющей является эталонная база страны, включающая около 160 первичных и более десяти тысяч других государственных эталонов различного уровня.

Крупнейшие хранители эталонов РФ – метрологические институты: Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии им. Д.И. Менделеева (ФГУП ВНИИМ) и Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений (ФГУП ВНИИФТРИ).

Кроме национальных эталонов единиц существуют международные эталоны, хранимые в Международном бюро мер и весов (МБМВ). Программой деятельности МБМВ предусмотрены систематические международные сличения национальных эталонов крупнейших метрологических лабораторий разных стран с международными эталонами и между собой.

Достоверность полученных в результате измерений значений величины определяется достижением требуемых в рамках поставленной измерительной задачи установленных показателей точности. В связи с этим в главном для метрологов законе № 102 ФЗ «Об обеспечении единства измерений» введено понятие «метрологические требования». Эти требования устанавливают к влияющим на результат и показатели точности характеристикам измерений, эталонов и средств измерений, а также к условиям, при которых эти

характеристики должны быть обеспечены. Обязательные метрологические требования устанавливаются нормативными правовыми актами, обязательными для соблюдения на территории России.

1.2 Государственное регулирование обеспечения единства измерений

Обеспечение единства измерений является важнейшей функцией государства и основывается на Конституции РФ. Выполнение государством этой функции в настоящее время называют государственным регулированием обеспечения единства измерений. Государственное регулирование (управление) распространяется на измерения в наиболее ответственных для жизнедеятельности видах деятельности. Это, прежде всего, деятельность по защите жизни и здоровья граждан, по охране окружающей среды и эксплуатации опасных промышленных объектов, при осуществлении торговых операций и государственного надзора.

Всего сфера государственного регулирования обеспечения единства измерений, в соответствии с законом № 102-ФЗ, распространяется на измерения, осуществляемые в 19 видах деятельности. Именно к этим измерениям устанавливают обязательные метрологические требования. Поэтому все измерения и, соответственно, средства измерений по своему юридическому статусу делятся на две группы: относящиеся к государственному регулированию (19 видов деятельности) и не относящиеся к нему (бытовые, технологические и т.д.). Например, термометры, используемые в быту для измерений температуры человека или в квартире, не подлежат государственному регулированию. А вот термометры, используемые, например, при коммерческом учёте тепла и для обеспечения безопасных условий эксплуатации атомных энергетических объектов, относятся к сфере государственного регулирования.

Государственное регулирование обеспечения единства измерений осуществляется в 6-ти формах:

1. Утверждение типа средств измерений и стандартных образцов.
2. Поверка средств измерений.
3. Аттестация методик измерений.
4. Метрологическая экспертиза.
5. Аккредитация на выполнения работ и услуг в области обеспечения единства измерений.
6. Государственный метрологический надзор.

Утверждение типа – это комплекс мероприятий по подтверждению соответствия средств измерений (серийных или единичных экземпляров) установленным метрологическим и техническим требованиям. Оно распространяется на вновь разработанные и находящиеся в эксплуатации, а также ввозимые из-за рубежа средства измерений, предназначенные для использования в сфере государственного регулирования. Среди этих мероприятий важное место отводится испытаниям в целях утверждения типа, которые проводят государственные центры испытаний. При утверждении типа устанавливают показатели точности, методику поверки и межповерочный интервал.

Решение об утверждении типа принимает Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии на основании положительных результатов испытаний для целей утверждения типа. Порядок проведения испытаний средств измерений и стандартных образцов установлен в правилах по метрологии МИ 3290-2010 (в редакции 26.09.2016 г.).

Поверкой средств измерений называют совокупность операций по экспериментальному подтверждению их характеристик установленным для них метрологическим требованиям. Этот вид метрологической деятельности является обязательным для средств измерений, предназначенных для применения в сфере государственного регулирования. До ввода в эксплуатацию и после ремонта проводят первичную поверку, а при эксплуатации – периодическую.

Измерения в сфере государственного регулирования должны выполняться по аттестованным методикам. *Методика (метод) измерений* – это совокупность конкретно описанных операций, которые позволяют обеспечить получение результатов измерений с установленными показателями точности согласно ГОСТ 8.010-2013.

Методики прямых измерений вносят в эксплуатационную документацию на средства измерений. Подтверждение соответствия этих методик обязательным метрологическим требованиям осуществляется при утверждении типа средств измерений. В остальных случаях требуется аттестация методик измерений.

Метрологическая экспертиза – анализ и оценка правильности установления и соблюдения метрологических требований. Требования к средствам измерений и стандартным образцам, содержащихся в проектах нормативных правовых документах, подлежат обязательной метрологической экспертизе.

Аккредитация в области обеспечения единства измерений проводится в целях признания компетентности юридического лица или предпринимателя выполнять работы и оказывать услуги по испытаниям в целях утверждения типа и поверке средств измерений, по аттестации методик измерений и по обязательной метрологической экспертизе.

Государственный метрологический надзор осуществляется за соблюдением обязательных требований к измерениям, единиц величин, эталонам, стандартным образцам и средствам измерений; к количеству фасованных товаров в упаковках, а также за наличием и соблюдением аттестованных методик измерений.

Обязательные требования к отклонениям количества фасованных в упаковку товаров от заявленного значения устанавливают в технических регламентах

Государственный метрологический надзор в соответствии с ФЗ № 102 «Об обеспечении единства измерений» осуществляет федеральный орган

исполнительной власти, уполномоченный на осуществление данного вида надзора. Эти функции в настоящее время возложены на Росстандарт.

Вся информация о нормативной базе и о результатах всех форм государственного регулирования обеспечения единства измерений должна содержаться в *федеральном информационном фонде*, формирование которого также организует Росстандарт.

1.3 Поверка и калибровка средств измерений

Достоверность результатов измерений определяется их погрешностью, которая в свою очередь складывается из методической погрешности (погрешности метода), инструментальной погрешности (погрешности средства измерений) и субъективной погрешности (погрешности оператора) (рисунок 1.3).

По мере совершенствования средств измерений (цифровой отсчёт, обработка измеренного сигнала и так далее) субъективная погрешность, обусловленная участием оператора в процессе получения результата измерений, может быть сведена к минимуму. В связи с этим особое внимание необходимо уделять двум другим составляющим погрешности: методической и инструментальной.

Вопросы установления и определения погрешности средств измерений решают при утверждении типа и проведении поверки средств измерений.

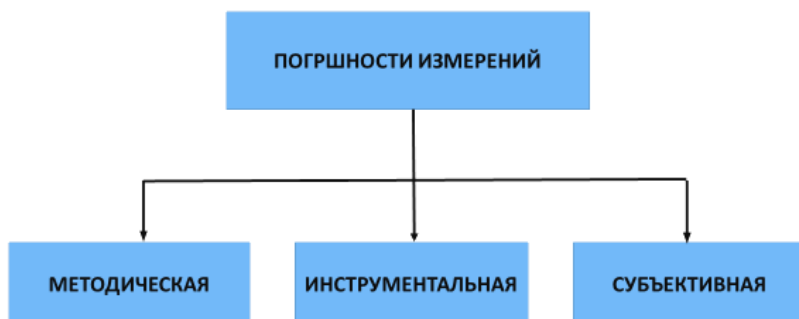


Рисунок 1.3 – Главные составляющие погрешности измерений

В соответствии с Федеральным законом 102-ФЗ *поверка* – это процедура оценки соответствия средства измерений метрологическим и техническим требованиям, установленным при проведении процедуры утверждения типа. Таким образом, поверке подлежат средства измерений, информация о которых содержится в федеральном информационном фонде по обеспечению единства измерений, в разделе утвержденные типы средств измерений.

Важной, ключевой задачей специалиста, осуществляющего поверку средства измерений, является установление факта утверждения типа представленного к поверке прибора. Отнесение средства измерений к утвержденному типу осуществляется посредством сравнения идентификационных данных прибора с информацией в описании типа.

Цель поверки – выяснить, соответствуют ли характеристики средства измерения регламентированным значениям и пригодно ли оно к применению по прямому назначению. Под поверкой средств измерения (*verification*) понимается установление органом метрологической службы (или другим официально уполномоченным органом, организацией) пригодности средств измерения к применению на основании экспериментально определяемых

метрологических характеристик и подтверждения их соответствия обязательным требованиям.

Выполнение поверочных работ регламентируется порядком проведения поверки средств измерений, с изменениями, утвержденными приказом Минпромторга РФ N 1815 в редакции от 28 декабря 2018 года.

Поверке подвергаются средства измерений утвержденного типа, при выпуске из производства, после ремонта и при эксплуатации. Средства измерений, применяющиеся в сфере Государственного регулирования в области обеспечения единства измерений (ГРОЕИ), в соответствии с Законом 102-ФЗ «Об обеспечении единства измерений» подлежат поверке в обязательном порядке. Остальные средства измерений, могут подвергаться поверке в добровольном порядке. Ответственность за своевременное предоставление СИ на поверку несут юридические и физические лица: владельцы и пользователи средств измерения.

Виды поверок:

- Первичная – осуществляется при введении в эксплуатацию нового экземпляра СИ, либо после его ремонта;
- Периодическая – проводится в период эксплуатации СИ, в соответствии с установленными межповерочными интервалами.
- Внеочередная – выполняется в случае несоответствия знака поверки форме, определенной действующим Порядком поверки СИ, повреждения знака поверки или пломбы, под которым понимается невозможность считывания информации, имеющейся на знаке или пломбе, органолептическими методами, невозможности блокирования посредством пломбы доступа к защищаемым ей элементам, воздействия на СИ механических нагрузок или иных неблагоприятных факторов, вызвавших сомнение в правильности его показаний и потребовавших дополнительной регулировки, связанной со снятием пломб.

Законодательной составляющей операций поверки является принятие решения о возможности применения поверяемого средства измерений в

сфере госрегулирования обеспечения единства измерений. Это решение оформляют в виде свидетельства о поверке и (или) клеймения средства измерений или извещения о непригодности.

Поверка проводится по методике, которая разрабатывается и проходит апробацию при испытаниях в целях утверждения типа в виде отдельного документа или раздела руководства по эксплуатации. Для групп средств измерений одинакового назначения эти методики могут содержаться в стандартах Государственной системы обеспечения единства измерений (ГСИ).

Калибровка – это совокупность операций по экспериментальному определению действительных значений метрологических характеристик средств измерений.

Калибровке могут подвергаться средства измерения, не входящие в сферу распространения государственного контроля и надзора (либо применяемые вне сферы ГМКиН), но при этом необходимо проконтролировать их метрологические характеристики, например, при выпуске СИ из производства или ремонта, при ввозе по импорту, при эксплуатации, прокате и продаже.

Калибровку средств измерения выполняют калибровочные лаборатории, которые осуществляют свою измерительную деятельность в строгом соответствии с положениями ГОСТ ISO/IEC 17025-2019, который содержит указания на применение терминологии документа ISO/IEC GUIDE 99:2007, дающий свое определение калибровке. Кроме этого еще одно определение калибровке дано в РМГ 29-2013. В соответствии с принятой в России терминологией «метрологические службы юридических лиц» с использованием эталонов, соподчиненных с государственными эталонами единиц величин. Средства калибровки (эталон) подлежат обязательной калибровке или поверке и при проведении калибровочных работ должны иметь действующие сертификаты о калибровке или свидетельства о поверке.

Результаты калибровки позволяют определять:

- действительные значения измеряемой величины;
- точностные характеристики средств измерений.

Фактически калибровка является составной частью операций поверки. Её результат оформляют в виде сертификата с указанием действительных метрологических характеристик средства измерений без оценки их соответствия установленным требованиям и без признания годности средства измерений к эксплуатации в сфере государственного регулирования. Сравнительные характеристики понятий «поверка» и «калибровка» приведены в таблице 1.1.

Таблица 1.1. – Сравнительные характеристики понятий «поверка» и «калибровка»

№ п/п	Поверка	Калибровка
1.	Проводится для средств измерений утверждённого типа	Проводится для любых средств измерений
2.	Обязательна для средств измерений, применяемых в сфере Госрегулирования	Добровольна для средств измерений, не применяемых в сфере госрегулирования
3.	Выполняется поверителем	Выполняется калибровщиком
4.	Имеет целью подтвердить соответствие средства измерений установленным требованиям	Имеет целью определить действительные метрологические характеристики
5.	Завершается выдачей свидетельства о поверке или извещения о непригодности	Завершается выдачей сертификата с указанием действительных метрологических характеристик
6.	Срок действия свидетельства ограничен	Срок действия сертификата не устанавливается

Право осуществления поверки могут получить юридические лица и индивидуальные предприниматели путём аккредитации по их ходатайству. Аккредитация на право калибровки является добровольной (не обязательной) процедурой и нужна в большей степени для признания результатов калибровки сторонними учреждениями и для поднятия имиджа предприятия. Аккредитацию метрологических служб на право проведения калибровочных работ осуществляет Федеральная служба по аккредитации (Росаккредитация), ФГУП ВНИИМС и аккредитованные ФГУП ВНИИМС юридические лица и индивидуальные предприниматели. Условием получения этого права является наличие у них соответствующих помещений, эталонов и поверочного оборудования, а также обученных поверителей и актуализированных нормативных документов в заявленной области аккредитации.

2 Основы термометрии

2.1 Температура и фазовые переходы

Термодинамическая температура – одна из семи физических величин, образующих Международную систему единиц СИ. Она определяет степень нагретости тела и зависит от энергии движения (поступательного, колебательного и вращательного) частиц из которых состоит тело.

Тела могут находиться в трёх основных состояниях: *твёрдом, жидком и газообразном*. Эти состояния называют агрегатными или фазовыми. Переход тела из одного агрегатного состояния в другое называют фазовым переходом. К таким переходам относятся плавление, кипение, конденсация и затвердевание.

Твёрдой фазе соответствуют более низкая температура тела и, соответственно, меньшие значения средней энергии движения атомов и молекул, из которых состоит тело. По мере повышения температуры энергия движения отдельных групп частиц возрастает настолько, что они начинают преодолевать силы их молекулярного и межатомного взаимодействия. Эти «коллективы» частиц уже могут достаточно свободно перемещаться, скользить относительно друг друга. Так происходит плавление вещества и появляется текучесть, характеризующая жидкую фазу тела. Дальнейшее нагревание тела приводит к таким значениям средней энергии его частиц, при которых их группы распадаются на отдельные частицы, которые уже движутся в пространстве автономно. Происходит кипение – процесс образования газовой фазы.

При охлаждении тела средняя энергия образующих его частиц падает и происходит процесс конденсации (превращение газовой фазы в жидкую), а затем – процесс затвердевания (переход жидкой фазы в твёрдую).

Наиболее знакомым для всех примером таких превращений являются фазовые переходы в воде (H_2O). В процессе нагревания при температуре $0\text{ }^{\circ}C$

происходит плавление (таяние) – переход воды из твёрдой фазы в жидкую, а при $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ происходит кипение – переход в газообразную фазу.

При охлаждении воды происходят фазовые переходы конденсации и затвердевания (замерзания). Для ртути температура плавления и затвердевания равна минус $39\text{ }^{\circ}\text{C}$, а для кипения и конденсации она составляет 385°C . Для самого тугоплавкого металла – вольфрама эти значения температуры равны, соответственно, $\approx 3415\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $\approx 5370\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Важной для термометрии особенностью фазовых переходов является воспроизводимость значений их температуры и её постоянство во времени, которое длится с момента начала перехода до его завершения (рисунок 2.1).

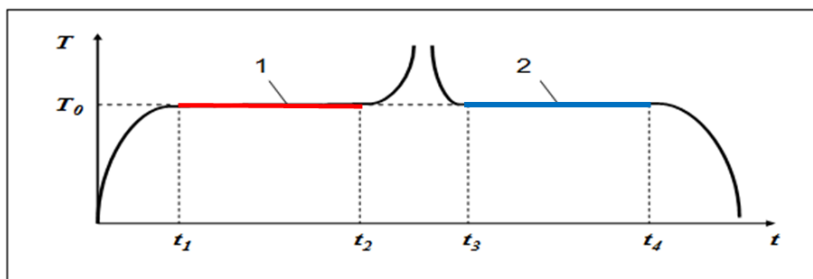


Рисунок 2.1 – Стабилизация температуры T_0 при фазовых переходах плавления и затвердевания вещества в процессе его нагревания и охлаждения:

1 – «площадка» плавления длительностью $[t_2, t_1]$,

2 – «площадка» затвердевания длительностью $[t_4, t_3]$.

2.2 Условные шкалы и единицы температуры

Глобальность температуры, как физической величины, характеризующей все происходящие в природе процессы и явления, требует её измерения. Измерение – это совокупность операций, выполняемых с помощью специальных технических средств, с целью определения значения

физической величины. Специальные технические средства, предназначенные для измерений температуры, называют термометрами.

Значение физической величины, как сейчас принято понимать – это число, указывающее, сколько единиц измеряемой величины соответствует количественной её определённости. Например, значение температуры плавления олова составляет 232 °С. Значение величины в этом случае содержит число (232) и единицу измерений температуры (°С).

Как появилось такое число, и единица измерений? Ведь существующее определение температуры не подсказывает ни способы, ни средства её измерений и, соответственно, возможность получения её значения.

Действительно, определение понятия «температура», как степени нагретости тела, которая зависит от энергии движения частиц, находящихся в нём, основано на интуитивном ощущении «нагретости», которое является субъективным. Оно не может быть использовано для количественной оценки температуры путём процедуры измерения. Измерить энергию движения каждой из частиц, образующих тело, не реально, так как известно, что только один моль вещества содержит около $6 \cdot 10^{23}$ (число Авогадро) таких структурных единиц вещества.

Поэтому история термометрии и её метрологического обеспечения насчитывает сотни лет и связана с именами выдающихся учёных (приложение 6.1). В конце 16-го века Галилео Галилей использовал в своих исследованиях термоскоп – прибор для фиксации изменений температуры, основанный на объёмном расширении ртути. Фиксация изменений температуры осуществлялась по измерению длины столбика ртути в стеклянном капилляре термоскопа. Единица температуры при этом не была установлена и, соответственно, не использовалась (рисунок 2.2).

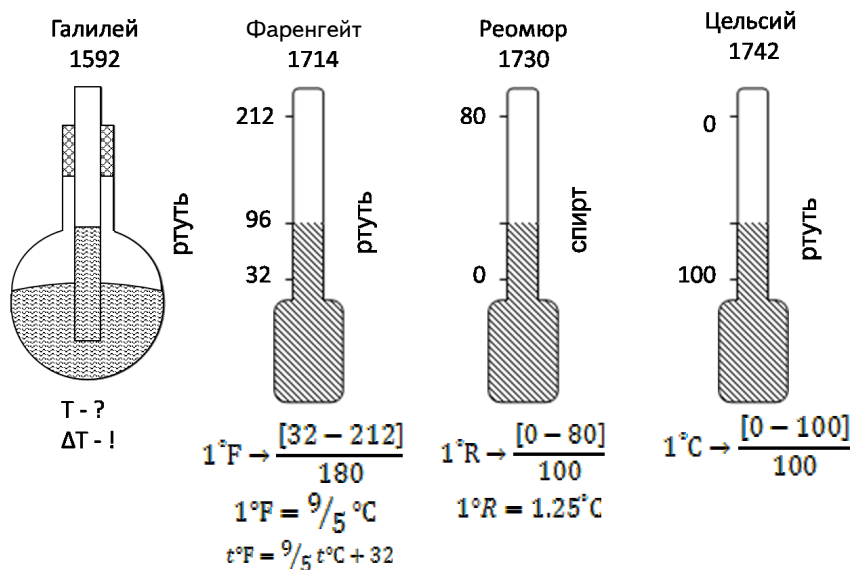


Рисунок 2.2 – Условные температурные шкалы.

В 1714 г. Фаренгейт предложил для измерений температуры ртутный термометр и шкалу, в которой фазовым переходам воды были приписаны значения $+32^{\circ}\text{F}$ и $+212^{\circ}\text{F}$. Интервал между этими температурами был поделён на 180 частей. Одна такая часть являлась единицей температуры и по аналогии с единицей угла была названа градусом Фаренгейта ($^{\circ}\text{F}$). Шкала до настоящего времени используется в ряде англоязычных стран, в том числе, в США.

Начало 18 века ознаменовалось в истории термометрии появлением еще двух известных температурных шкал и соответствующих единиц температуры. Французский учёный Реомюр в 1730 г. предложил использовать для построения температурной шкалы основной температурный интервал между значениями температуры таяния льда и кипения воды. Этим значениям Реомюр приписал числа 0 и 80. Интервал между ними разбивался на 80 частей и одна такая часть являлась единицей

температуры – градус Реомюра ($^{\circ}\text{R}$). По отношению к использованным для построения шкалы фазовым переходам таяния льда и кипения воды было введено понятие «реперная точка» (от французского «репер» – опорный, постоянный). Шкала длительное время использовалась в ряде стран, в том числе и в России (до 1918 г.).

Шкала Цельсия была предложена шведским учёным Цельсием в 1742 г. Основной температурный интервал шкалы был определён реперными точками плавления льда и кипения воды, которым были приписаны значения 0 и 100. Интервал был разделён на 100 равных частей с использованием шкалы ртутного термометра. Таким образом, единицей температуры в шкале Цельсия ($^{\circ}\text{C}$, градус Цельсия) является 1/100 часть температурного диапазона между температурами плавления и кипения воды.

Создание рассмотренных температурных шкал и введение соответствующих единиц измерений температуры способствовало развитию науки и технологий в последующее столетие. Однако у этих шкал имеется два общих недостатка: произвольность выбора значений, приписываемых температуре реперных точек, и чисел, на которые делят основной температурный интервал, а также предположение о линейности зависимости объёма от температуры термометрических жидкостей (ртути или спирта), используемых для получения промежуточных значений шкалы. В действительности отклонение от линейности в середине основного температурного интервала шкалы Цельсия составляет около $0,25^{\circ}\text{C}$ (у ртути), и около $1,5^{\circ}\text{C}$ (у спирта). Поэтому шкалы, имеющие такие недостатки, называют условными.

2.3 Газовая термометрия и абсолютная температурная шкала

В 1832 г. французский учёный Клапейрон открыл закон, устанавливающий связь между основными параметрами состояния идеального газа, находящегося в замкнутом пространстве

$$p = n RT / V. \quad (2.1)$$

Здесь p, T, V – соответственно, давление, температура и объём газа, R – универсальная газовая постоянная, n – коэффициент, учитывающий свойства конкретного газа.

Идеальный газ – это газ, у которого длина свободного пробега молекул намного больше их размера, а энергия движения намного превосходит энергию межмолекулярного взаимодействия. В этом случае физическая модель движения молекул может описываться упругим соударением шаров (без «прилипания»). Такая модель допускает математическое описание в виде закона (2.1). Великий русский учёный и основатель российской метрологии, как науки, Д.И. Менделеев расшифровал значение коэффициента « n ». Это число молей газа, содержащихся в его объёме, которое определяется соотношением:

$$n = \frac{m}{\mu}, \quad (2.2)$$

где m – масса газа, μ – его молекулярная масса.

С учётом этого соотношения (2.1) принимает вид:

$$p = \frac{mR}{\mu V} T. \quad (2.3)$$

Это соотношение называют уравнением состояния идеального газа или законом Клайперона – Менделеева. Из этого теоретически обоснованного и экспериментально подтверждённого закона следует несколько важных для термометрии выводов.

Во-первых, подстановка в уравнение (2.3) значений температуры, полученных с использованием условных шкал, даёт абсурдные результаты с

точки зрения физического смысла. Например, при $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ давление газа в футбольном мяче, автомобильном колесе, в баллоне для газосварки не становится равным нулю. А отрицательное абсолютное давление, которое должно появиться при отрицательных по шкале Цельсия значениях температуры, не имеет в этих случаях физического смысла.

Во-вторых, при постоянном объёме и количестве газа ($V, n - const$) его давление прямо пропорционально температуре. На использовании этой зависимости можно создать термометр для построения линейной шкалы температуры, значения которой будут не условными, а абсолютными, так как основаны на фундаментальном законе термодинамики и, следовательно, ему соответствуют.

Уравнение измерений абсолютной температуры таким термометром, как следует из (2.3) имеет вид:

$$T = \frac{\mu V}{mR} P. \quad (2.4)$$

Для получения значений абсолютной температуры среды необходимы результаты измерений массы m и объёма V газа, его давления P и данные по его молекулярной массе μ . Кроме этого необходимо учитывать отклонения свойств газа от идеального путём введения поправок.

В-третьих, из закона следует, что существует температура со значением, равным нулю ($T = 0$), при которой давление газа становится также равным нулю. Это означает, что при этой температуре прекращаются соударения молекул газа со стенками сосуда, в котором он находится. Следовательно, «энергия движения частиц, из которого состоит тело» становится равной нулю. В соответствии с определением понятия «температура» такое состояние системы частиц является физическим (термодинамическим) нулём температуры, которое называют абсолютным нулём температуры.

Закон Клайперона – Менделеева явился основой для создания газового термометра и построения абсолютной термодинамической шкалы.

Устройство газового термометра с постоянным объёмом представлено на рисунке 2.3.

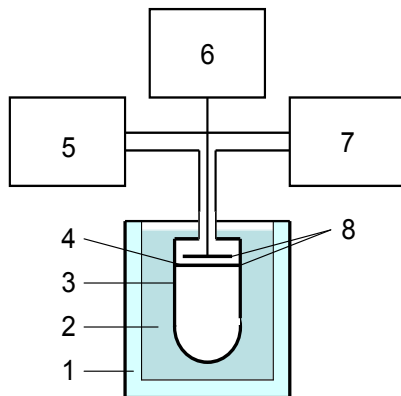


Рисунок 2.3 – Схема газового термометра: 1 – теплоизолированный сосуд, 2 – вещество в состоянии фазового перехода, 3 – колба с газом, 4 – металлическая мембрана, 5 – регулируемый источник давления, 6 – измеритель электрической ёмкости, 7 – прецизионный измеритель давления, 8 – обкладки конденсатора.

Колбу 3 термометра помещают в реперную точку, например, в тающий лёд 2, находящийся в теплоизолированном сосуде 1. Давление газа приводит к деформации мембраны 4 – обкладки конденсатора 8. При этом измеритель 6 ёмкости прибор отображает её изменение. Регулируя источник 5 давления, подбирают такое его значение, при котором мембрана возвращается в исходное положение. Это соответствует ситуации, при которой давление в нижней части колбы компенсируют внешним источником давления. Значение давления, необходимое для такой компенсации, измеряют прибором 7. Такой приём позволяет исключить трудно учитываемое и искажающее влияние давления газа, находящегося при другой температуре в

капилляре, соединяющем колбу с измерителем давления. Полученное таким образом значение давления, соответствует температуре таяния льда.

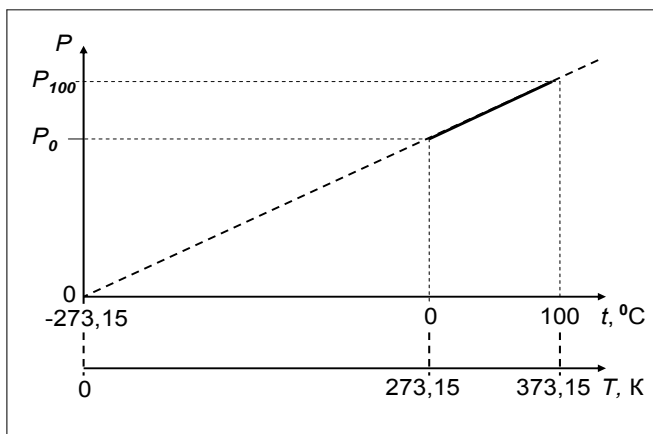


Рисунок 2.4 – Принцип построения абсолютной температурной шкалы.

Связь значений температуры в шкале Цельсия с её абсолютным термодинамическим значением первоначально была установлена следующим образом. Измерялось давление p_0 газа в колбе газового термометра при температуре $t_0 = 0^\circ\text{C}$, а затем – давление p_{100} при температуре $t_{100} = 100^\circ\text{C}$ (кипение воды). Если нанести полученные значения p_0 и p_{100} на график зависимости $p = p(t)$ (рис. 2.4) и провести через них прямую до точки, соответствующей нулевому давлению, то она пересечёт ось температуры при значении $-273,15$ °C. Нулевое давление газа, как следует из уравнения его состояния (2.1), соответствует физическому (абсолютному) нулю температуры, при котором «замораживается», прекращается движение частиц, из которого состоит тело. И этот нуль находится на $273,15$ °C ниже температуры таяния льда и ниже температуры кипения воды на $373,15$ °C. Шкалу температуры, значения которой начинают отсчёт от абсолютного нуля и подстановка которых в формулы, описывающие законы физики, даёт правильные результаты, называют абсолютной термодинамической. За

исключительный вклад выдающегося английского учёного Томсона (лорда Кельвина) в создание этой шкалы её называют ещё шкалой Кельвина.

Подставляя измеренное в точке таяния льда значение давления в уравнение (2.4) с учётом значений всех других входящих в него величин, рассчитывают значение абсолютной термодинамической температуре этого фазового перехода. Аналогичные значения термодинамических температур получают и для других реперных точек, погружая колбу газового термометра, например, в чистые металлы, находящиеся при температуре фазовых переходов плавления-затвердевания.

Несмотря на простоту принципиальной схемы газового термометра, его практическая реализация и учёт влияния различных факторов на результаты измерений термодинамической температуры достаточно сложны. Это, в частности, связано с необходимостью учёта:

- температурного коэффициента расширения материала колбы, от которого зависит её объём;
- процессов сорбции и десорбции, от которых зависят истинная масса и молекулярная масса газов, находящихся в колбе;
- отклонение газа от идеального, которое обусловлено силами взаимодействия и размерами его молекул (уравнение Ван-дер-Ваальса).

Таких факторов, которые влияют на погрешность измерений термодинамической температуры, насчитывают более десяти. Поэтому газотермические измерения являются достаточно сложным и дорогостоящим экспериментом, требующим использования самых последних достижений измерительной техники и высокой квалификации исполнителей. Такие измерения постоянно ведутся в наиболее развитых странах. Их целью является, прежде всего, уточнение значений температуры реперных точек шкалы. Это необходимо для максимального приближения значений температуры, воспроизводимых национальными эталонами различных стран, к истинным термодинамическим значениям.

2.4 Температура таяния льда и тройной точки воды

При построении температурных шкал важную роль имеет выбор основных реперных точек. Главная их особенность – это стабильность и воспроизводимость значения температуры фазового перехода, на котором основана эта точка. Долгое время, начиная с Реомюра, Цельсия, затем Кельвина и до середины 20-го века, основной реперной точкой соответствующих шкал являлась температура плавления (таяния) льда воды, равная $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($273,15\text{ K}$). Устройство для воспроизведения температуры таяния льда приведено на рисунке 2.5 а.

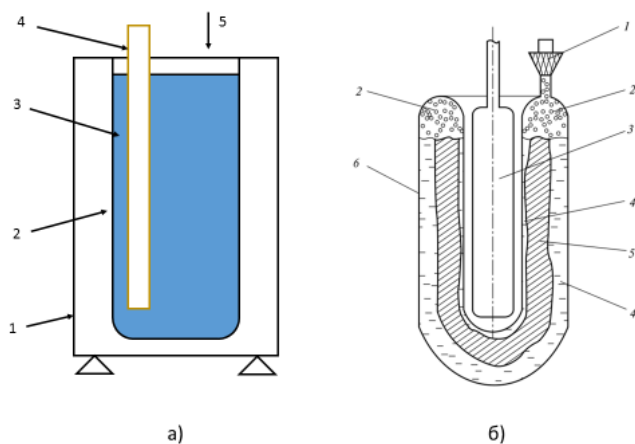


Рисунок 2.5 – а) нуль-термостат; б) ампула тройной точки.

В теплоизолированный сосуд 2, находящийся в защитном корпусе 1, засыпают смесь 3 дроблёного льда или снега с водой. Смесь готовят из чистой дистиллированной воды. Воду, образующуюся на дне сосуда при таянии, удаляют через трубку 4, например, с помощью резиновой груши. Температуру таяния определяют по стабилизации показаний T_x поверяемого

термометра 5. Абсолютная погрешность Δ термометра в этом случае равна разности

$$\Delta = T_x - T_0, \quad (2.5)$$

где $T_0 = 0^\circ\text{C}$ – температура таяния льда, воспроизводимая, в лучшем случае, с погрешностью $1 \cdot 10^{-3}^\circ\text{C}$.

Это – классический пример поверки средства измерений или аттестации эталонного средства методом прямых измерений, когда поверяемый (аттестуемый) термометр помещается в среду, в которой происходит фазовый переход с достоверно известным значением температуры.

В метрологии принято условие, что погрешность эталона при поверке должна быть, как правило, в три раза меньше, чем у поверяемого средства измерений или аттестуемого эталона. К сожалению, воспроизводимость температуры плавления льда характеризуется погрешностью уровня $\pm 0,001^\circ\text{C}$. Следовательно, реперная точка таяния льда может передавать единицу температуры только термометрам, имеющим погрешность более $0,003^\circ\text{C}$. Уже к середине прошлого столетия такая воспроизводимость основной реперной точки шкалы не соответствовала требуемой точности воспроизведения и передачи единицы температуры на уровне первичных эталонов. Сейчас она соответствует уровню эталонов 1-го разряда.

В связи с этим в качестве основной реперной точки шкалы было предложено использовать температуру тройной точки воды. Тройная точка вещества – это состояние с высокой стабильностью температуры, при котором вещество находится в замкнутом объёме одновременно в трёх фазах: твердой, жидкой и газообразной. Для получения требуемой стабильности и воспроизводимости температуры тройной точки необходимо выполнить следующие условия: использование максимально возможной чистоты вещества, отсутствие его взаимодействия с другими веществами, высокая

герметичность ампулы, в которой заключено вещество, находящееся в трёхфазном состоянии.

Ампула для реализации тройной точки воды (рисунок 2.5 б) содержит стеклянную колбу 3 с термометрическим каналом. Колбу помещают в сосуд Дьюара 6 и заполняют на 4/5 высоты химически чистой водой 4 (H₂O) с контролируемым и установленным изотопным составом. Затем через патрубок 1 из колбы откачивают воздух (смесь азота N₂, углекислого газа CO₂ и кислорода O₂). При откачке воздуха давление над поверхностью воды падает и, вследствие этого, она закипает при комнатной температуре. Стеклянный патрубок при этом запаивают. В этом случае над поверхностью жидкой фазы воды образуется её вторая фаза – насыщенный пар 2, давление которого более чем в тысячу раз меньше атмосферного. Поэтому надёжная герметизация ампулы должна гарантировать невозможность натекания в неё воздуха. Третью фазу воды образуют охлаждением термометрического канала, например, с помощью паров жидкого азота, намораживанием на её поверхности слоя льда 5. Температура такой трёхфазной системы воды всего лишь на 0,01 °С выше температуры таяния льда.

Воспроизводимость и нестабильность температуры тройной точки воды достигает значений $2 \cdot 10^{-5}$ °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. на 10-й Генеральной конференции по мерам и весам было утверждено новое определение единицы температуры, как 1/273,16 части интервала между абсолютным нулём и температурой тройной точки воды – главной реперной точки температурной шкалы. Ей приписано значение 273,16 К (0,01 °С), которое лишь на 0,01 К выше температуры плавления льда.

2.5 Термометрические свойства. Классификация термометров

В основу практической термометрии положена зависимость какого-либо свойства веществ от температуры. Практически все физические свойства

зависят от температуры. Однако для целей термометрии используют, чаще всего, монотонные, близкие к линейным, однозначные зависимости. Свойства, имеющие такие зависимости от температуры, называют термометрическими. Наиболее распространёнными являются шесть термометрических свойств, основанных на следующих зависимостях:

— зависимость объёма жидкостей от температуры, которую используют в жидкостных термометрах в диапазоне от -200 до 600°C (минимальная погрешность $0,001^{\circ}\text{C}$);

— зависимость давления газа или жидкости от температуры, которую используют в манометрических термометрах в диапазоне от -200 до 650°C (минимальная погрешность $0,5^{\circ}\text{C}$);

— зависимость электрического сопротивления металлов и полупроводников от температуры, которую используют в термометрах сопротивления в диапазоне от -260 до 1100°C (минимальная погрешность $5 \cdot 10^{-5}^{\circ}\text{C}$);

— зависимость электрического сигнала, возникающего в зоне электрического контакта разнородных металлов и сплавов от температуры, которую используют в термоэлектрических термометрах при значениях от -200 до 2500°C (минимальная погрешность $0,01^{\circ}\text{C}$).

Эти четыре термометрических свойства являются основой контактных методов и средств термометрии. Они предполагают наличие механического теплового контакта чувствительного элемента термометров со средой, температуру которой необходимо измерить. В этом случае тепловой контакт обеспечивается всеми тремя видами теплообмена (в различных состояниях): *кондуктивным* – теплопроводностью среды, *конвективным* – движением жидкости или газа и *радиационным* – тепловым электромагнитным излучением.

Первые два термометрических свойства не требуют использования электрических сигналов и их измерений. Их относят к неэлектрическим

методам измерений температуры. Два других контактных метода термометрии основаны на преобразовании температуры в значения сопротивления или термоэлектрического сигнала, которые измеряют электрическими методами. Преобразование осуществляется в чувствительных элементах первичных измерительных преобразователей (датчиков) температуры, которые являются составной частью термометров сопротивления или термоэлектрических термометров. Эти два контактных метода термометрии и средства, их реализующие, называют электрическими. Измерительные приборы для измерений сигналов датчиков называют вторичными термометрическими приборами.

Бесконтактная термометрия основана на законах теплового излучения нагретых тел. Термометры, использующие эти законы, сейчас принято называть радиационными. Первоначально они были предназначены для измерений высоких значений температуры, главным образом, в металлургии и поэтому их называли пирометрами (от греческого «пирос» – огонь). Этот термин широко используют до сих пор. Главные преимущества пирометров – возможность дистанционных измерений без контакта с объектами, которые находятся, например, не только при высоких температурах, но и при высоком электрическом напряжении. В последнем случае объекты измерений могут иметь низкие значения температуры. Поэтому использовать при этом термин «пирометры» не совсем корректно.

Бесконтактные измерения температуры используют два термометрических свойства:

– зависимость яркости нагретых тел от температуры, которую используют в яркостных моно- или полихроматических термометрах (пирометрах) в диапазоне от -100 до 10000°C с минимальной погрешностью около $0,5^{\circ}\text{C}$;

– зависимость мощности теплового излучения (теплового потока) нагретых тел от температуры, которую используют в термометрах

(пирометрах) полного или частичного излучения в диапазоне от -100 до 2500 $^{\circ}\text{C}$ с минимальной погрешностью около $0,5^{\circ}\text{C}$.

В таблице 2.1 приведены обобщённые сведения по наиболее распространённым методам и средствам термометрии.

Таблица 2.1

Методы измерений	Термометрические свойства	Тип термометров, диапазон T , $^{\circ}\text{C}$	Величина, отображающая температуру; единица измерений	Δ_{\min} , $^{\circ}\text{C}$
Контактные	Объём	Жидкостные стеклянные	h^* , мм	0,001
	Давление	Манометрические	P , Па	0,5
	Сопротивление	Терморезисторные	R , Ом	$5 \cdot 10^{-5}$
	ТЭДС	Термоэлектрические	e , мВ	0,01
Бесконтактные (радиационные)	Яркость	Яркостные моно- и полихроматические	i , мА R , Ом	0,5
	Тепловой поток	Полного и частичного излучения	$e(U)$, мВ	0,5

Примечание – h^* – высота столба термометрической жидкости, p – **давление жидкости** или газа, R – сопротивление чувствительного элемента (ЧЭ), e – сигнал (ТЭДС) термоэлектрического преобразователя, i (R) – ток (или сопротивление), $e(U)$ – ТЭДС или выходное напряжение чувствительного элемента, Δ_{\min} – достижимое значение минимальной погрешности термометров.

2.6 Международная температурная шкала

Общая направленность научно-технического прогресса – это стремление к совершенствованию средств получения точной, достоверной и максимально близкой к истине информации о различных объектах, процессах и явлениях. В термометрии эта направленность проявляется в стремлении получить результаты измерений температуры со значениями,

соответствующими фундаментальным законам природы. Поэтому в ведущих странах мира непрерывно ведутся газотермические измерения, направленные на совершенствование методов и средств воспроизведения и передачи единицы температуры и температурной шкалы с целью максимального их приближения к термометрическим (истинным) значениям. Это работы координируют международные метрологические организации: Международный комитет по мерам и весам (МКМВ) и Международное бюро по мерам и весам (МБМВ). Полученные в разных странах результаты уточнения температурной шкалы, в частности, значений температуры реперных точек, усредняют, обрабатывают и согласовывают в Консультационном комитете по термометрии, созданном при этих организациях. Затем этот комитет рекомендует такую шкалу к утверждению Генеральной конференцией по мерам и весам – высшему международному органу, созданному в рамках Метрической конвенции.

Утверждённая Генеральной конференцией температурная шкала, основанная на усреднении и обобщении результатов газотермических исследований, полученных в разных странах, называют Международной температурной шкалой (МТШ). Главная задача, которую решают принятием такой шкалы, это обеспечение правового международного единства измерений температуры. Другая задача – это практическая направленность внедрения шкалы, так как в описании шкалы приводятся сведения о реальных методах и средствах её воспроизведения и передачи национальными эталонами. Поэтому в названии международной шкалы использовалось слово «практическая». Первая Международная практическая температурная шкала была принята в 1927 году (МТШ – 27). В последующем шкалы принимали примерно через 20 лет (МПТШ – 48, МПТШ – 68, МТШ – 90).

В настоящее время действует шкала МТШ – 90. Основной температурный интервал шкалы находится между температурой тройной точкой воды, которой приписано точное значение $273,16\text{ К}$ ($0,01^\circ\text{C}$), и

абсолютным (виртуальным) нулём 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 ($1\text{К} \equiv 1^\circ\text{C}$). Это обусловлено тем, что, как было показано выше, абсолютная шкала строилась на основе шкалы Цельсия. Поэтому и связь между значениями температуры в этих шкалах сохраняется так как температура таяния льда (воды) по-прежнему равна 0°C ($273,15\text{К}$).

$$t, ^\circ\text{C} = T, \text{K} - 273.15,$$

$$T, \text{K} = t, ^\circ\text{C} + 273.15,$$

Принятие каждой новой МТШ связано с развитием измерительной техники и технологий, с новыми научными знаниями, с совершенствованием методов исследований и методик газотермических измерений. В частности, появляются технологии получения высокочистых металлов для реализации реперных точек, прецизионные измерители сигналов эталонных термометров и автоматических многоканальных регуляторов, формирующих тепловой режим реперных точек; исследуются и внедряются новые физические явления – тройные точки веществ, обладающие более высокими метрологическими характеристиками, чем фазовые переходы, например, кипения и плавления воды и затвердевания ртути (отменены в качестве реперных точек в МПТШ – 68 и МТШ – 90).

Шкала МТШ – 90 также имеет ряд отличий от предыдущей шкалы МПТШ – 68. Взамен температуры кипения воды в МТШ – 90 введены новые реперные точки плавления галлия (Ga) $\approx 30^\circ\text{C}$ и затвердевания индия (In) $\approx 156^\circ\text{C}$. Это позволило повысить точность воспроизведения шкалы и единицы температуры в наиболее востребованном диапазоне от 0 до 250°C , так как до этого в нём оставалось только две реперные точки на краях диапазона:

тройная точка воды ($0,01\text{ }^{\circ}\text{C}$) и температура затвердевания олова (Sn) $\approx 232\text{ }^{\circ}\text{C}$. Вместо реперной точки сурьмы (Sb) $\approx 630\text{ }^{\circ}\text{C}$ введена лучше воспроизводимая точка затвердевания алюминия (Al) $\approx 660\text{ }^{\circ}\text{C}$. Были также уточнены значения других реперных точек и расширен диапазон воспроизводимых температур в область сверхнизких температур (с $4,2\text{ K}$ до $0,8\text{ K}$). Наибольшие отклонения МТШ – 90 от МТШ – 68 приходится на область значений около $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ и на температуры выше $800\text{ }^{\circ}\text{C}$. В частности, температура кипения воды при нормальном давлении равна $99,974\text{ }^{\circ}\text{C}$, что на $0,026\text{ }^{\circ}\text{C}$ ниже её традиционного значения – $100\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Для получения промежуточных между реперными точками значений шкалы используют так называемые интерполяционные термометры с изученным характером зависимости термометрического свойства от температуры. Если зависимость имеет вид, например, квадратичной па-

$$e(T) = aT^2 + bT + c, \quad (2.6)$$

раболы то значения её коэффициентов, a , b , c – индивидуальных для каждого эталонного термопреобразователя, определяют по трём реперным точкам в соответствующем диапазоне температуры. Например, для эталонного термоэлектрического преобразователя в диапазоне от 300 до $1100\text{ }^{\circ}\text{C}$ используют реперные точки затвердевания цинка ($419\text{ }^{\circ}\text{C}$), алюминия ($660\text{ }^{\circ}\text{C}$) и меди ($1084\text{ }^{\circ}\text{C}$). При этом получают систему трёх уравнений с тремя неизвестными (a , b , c):

$$\begin{aligned} e(\text{Zn}) &= a(419)^2 + b(419) + 419, \\ e(\text{Al}) &= a(660)^2 + b(660) + 660, \\ e(\text{Cu}) &= a(1100)^2 + b(1100) + 1100, \end{aligned} \quad (2.7)$$

где $e(\text{Zn})$, $e(\text{Al})$, $e(\text{Cu})$ – измеренные значения сигналов термопреобразователя, соответствующие значениям температуры,

использованных реперных точек. Эта система имеет единственное решение, из которого получают искомые значения a_0 , b_0 , c_0 коэффициентов параболы (2.6).

Реперные точки плавления-затвердевания чистых металлов реализуют в кварцевых ампулах 1 (рисунок 2.6), внутри которых находится тигель 2 с крышкой 5 из графита. Внутри тигля расположена пробирка 4 из кварцевого стекла, выполняющая функцию термометрического канала 6, 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, снабжённой тремя нагревателями (1, 3 и 6). Труба помещена в теплоизолированный корпус 4. Температуру центральной части печи задают и поддерживают при постоянном значении 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 достигают с помощью автоматических регуляторов 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 её центральной части. Этим достигается однородность температурного поля печи. В таких условиях длительность фазового перехода составляет несколько часов.

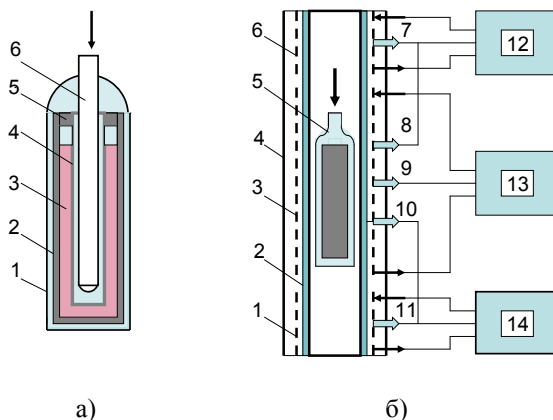


Рисунок 2.6 – а) ампула реперной точки плавления-затвердевания металлов: 1 – кварцевая ампула, 2 – графитовый тигель, 3 – чистый металл, 4 – кварцевая пробирка, 5 – графитовая крышка, 6 – термометрический канал;
 б) печь для воспроизведения реперной точки: 1 – нижний охранный нагреватель, 2 – керамическая 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.

МТШ-90 воспроизводится с помощью реперных точек, которые приведены в таблице 2.2. Точки плавления и затвердевания указаны для нормального атмосферного давления 101325 Па (760 мм рт. ст.).

Таблица 2.2

Реперная точка		T90/К	t90/°C
e-H ₂	Тройная точка	13.8033	-259.3467
e-H ₂	Давление паров	≈17	≈-256.15

e-H₂	Давление паров	≈20.3	≈ -252.85
Ne	Тройная точка	24.5561	-248.5939
O₂	Тройная точка	54.3584	-218.7916
Ar	Тройная точка	83.8058	-189.3442
Hg	Тройная точка	234.3156	-38.8344
H₂O	Тройная точка	273.16	0.01
Ga	Точка плавления	302.9146	29.7646
In	Точка затвердевания	429.7485	156.5985
Sn	Точка затвердевания	505.078	231.928
Zn	Точка затвердевания	692.677	419.527
Al	Точка затвердевания	933.473	660.323
Ag	Точка затвердевания	1234.93	961.78
Au	Точка затвердевания	1337.33	1064.18
Cu	Точка затвердевания	1357.77	1084.62

Примечание – **Водород* может существовать в двух формах (модификациях) — в виде орто- и пара- водорода. В молекуле ортоводорода o-H₂ (т. пл. -259,10 °С, т. кип. -252,56 °С) ядерные спины направлены одинаково (параллельны), а у параводорода p-H₂ (т. пл. -259,32 °С, т. кип. -252,89 °С) — противоположно друг другу (антипараллельны). Равновесная смесь этих модификаций o-H₂ и p-H₂ при заданной температуре и называется равновесный водород e-H₂.

Интерполяционными термометрами в МТШ–90, обеспечивающими диапазон от температуры тройной точки водорода (H₂) ≈ -259 °С до температуры затвердевания серебра (Ag) ≈ 961°С, являются платиновые термометры сопротивления. Для более высоких температур интерполяция и

экстраполяция шкалы осуществляется методом радиационной термометрии с использованием закона излучения Планка.

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

- отсутствием новых значимых результатов исследований, являющихся основанием для уточнения шкалы;

- проведением подготовки к переопределению единиц основных физических величин килограмма, ампера, моля и кельвина через фундаментальные константы.

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.

2.7 Новый Российский мировой эталон температуры

В настоящее время ученым из России удалось с высокой точностью определить значение постоянной Больцмана — одной из констант, с помощью которых описываются фундаментальные законы природы и свойства материи. Уточнённые данные позволяют, в том числе, в значительной степени сократить погрешность при измерении температуры. Константа Больцмана — фундаментальная физическая постоянная, определяющая связь между температурой и энергией. Она названа в честь австрийского физика Людвиг Больцмана, сделавшего большой вклад в статистическую физику, в которой эта постоянная играет ключевую роль. Её значение в Международной системе единиц (СИ) составляет $1,380649 \cdot 10^{-23}$ Дж/К.

Созданная современная аппаратура, потенциально позволяющая вывести Россию на одно из лидирующих мест в мире в области температурных измерений. Данная аппаратура, в том числе, способна расширить диапазон воспроизведения единицы температуры до 3473 градусов по шкале Кельвина и сократить погрешность воспроизведения в 1,5 – 2 раза.

В ФГУП «ВНИИФТРИ» проведено комплекс исследований, на основе которых разработано и успешно испытано комплекс оборудования, в том числе и акустический газовый термометр, которое будет включено в Государственный первичный эталон единицы температуры в диапазоне (0,3-273,16) К. Эталон ГЭТ 35-2010 создан во ВНИИФТРИ в 1972–90 годах и переутверждён в 2010 году. Он представляет собой комплект термометров сопротивления в двух блоках сравнения. Контрольная аппаратура включает устройства для точных измерений давления и сопротивления, комплект оборудования для реализации температуры реперных точек, криостаты сравнения и газовый интерполяционный термометр. Кроме поверки, при необходимости набор контрольной аппаратуры позволяет проводить полную градуировку термометров согласно Положению о международной температурной шкале МТШ-90.



Рисунок 2.7 – Эталон единицы температуры «Кельвина»
(принадлежит ФГУП «ВНИИФТРИ»)

В основе работы новых термометров лежит метод акустической газовой термометрии. Оборудование не имеет ограничения на применение рабочего вещества и может использоваться на протяжении многих лет с сохранением исходных метрологических параметров. Эксперты утверждают, что термометры также можно применять в системах, работающих без постоянного обслуживания. На их основе планируется внедрять новую температурную шкалу, переход на которую Международное бюро мер и весов намерено осуществить в ближайшие годы.

Подтверждена перспективность разработанного оборудования по результатам деятельности, проводимой Метрологическим консорциумом по проекту «Реализация нового определения кельвина». В ходе мероприятия профильные организации из разных стран представили предварительные результаты измерений отклонения температуры, которая воспроизводится по шкале МТШ-90, действующей в настоящее время, от термодинамической температуры, которая воспроизводится по акустическому газовому термометру. Сравнение информации, представленной ведущими метрологическими организациями РФ, Германии, США, Франции, Великобритании и Италии, показало хорошее соответствие исследований ФГУП «ВНИИФТРИ» с данными работ зарубежных институтов.

Переход на использование новой шкалы температуры потребует замены основного оборудования, используемого Государственного первичного эталона ГЭТ 35-2010. На это направлена разработка НИИ, которая позволит получить мировое признание российских измерительных возможностей и обеспечит возможность использования поверенных и откалиброванных в России измерителей влажности, термометров и других приборов для проведения торговых операций, учета количества принятой и отпущенной нефти, сжиженного природного газа и нефтепродуктов. Таким образом, разработка позволит сохранить независимость отечественных потребителей и производителей от метрологических организаций других стран.

3 Контактная термометрия

3.1 Жидкостные стеклянные термометры

Принцип действия стеклянных жидкостных термометров основан на зависимости объёма жидкости от температуры. Эти термометры предназначены для использования в диапазоне от -200°C до 600°C с минимально достижимой погрешностью $\pm 0,001^{\circ}\text{C}$.

Тепловое расширение жидкости используют в качестве термометрического свойства, а саму жидкость при этом называют *термометрической*. Изменение объёма термометрической жидкости при изменении её температуры характеризуют температурным коэффициентом объёмного расширения β .

В качестве термометрических жидкостей чаще всего применяют ртуть. Ртуть обладает рядом достоинств по сравнению с другими термометрическими жидкостями, в частности:

- зависимость объёма ртути от температуры стабильна, достаточно линейна и хорошо воспроизводима;

- ртуть не смачивает стекло, а, следовательно, не прилипает к капилляру термометра;

- ртуть при нормальном атмосферном давлении остаётся в жидком состоянии в достаточно широком интервале температур от $-38,9$ до $356,6^{\circ}\text{C}$;

- давление насыщенных паров ртути при температуре выше $356,6^{\circ}\text{C}$ невелико по сравнению с другими жидкостями, а, следовательно, возможно достаточно просто увеличить верхний предел измерений термометров путём создания дополнительного давления в их капилляре.

К недостаткам ртути можно отнести её токсичность и сравнительно небольшой температурный коэффициент расширения, который равен $\beta = 0,00018 \text{ K}^{-1}$. Для расширения диапазона измерений ниже минус 38°C в ртуть добавляют таллий.

Кроме ртути в стеклянных термометрах применяют органические жидкости, такие, как этиловый спирт, толуол, эфир, керосин, пентан и другие.

При работе с жидкостными термометрами необходимо учитывать, что под влиянием температуры расширяется не только термометрическая жидкость, но и её стеклянные резервуар и капилляр, в которых находится жидкость. Поэтому при повышении температуры происходит изменение объёма жидкости, уменьшенное на величину изменения объёма резервуара и капилляра.

В таблице 3.1 приведены некоторые характеристики основных термометрических жидкостей.

Таблица 3.1

Жидкость	Пределы измерений		Средние значения коэффициента β , K^{-1}
	Нижний	Верхний	
Ртуть	– 35	600	0,00018
Этиловый спирт	– 80	80	0,00105
Толуол	– 90	200	0,00109
Эфир	– 120	25	0,00152
Пентан	– 200	20	0,00092

По конструктивному исполнению стеклянные жидкостные термометры бывают: палочные – тип А, с вложенной шкалой – тип Б, с наружной шкалой – тип В (рисунок 3.1). Шкала термометров типа А наносится непосредственно на наружную поверхность капиллярной трубки. Шкала термометров типов Б и В наносится на прямоугольную однородную и контрастную по цвету пластину.

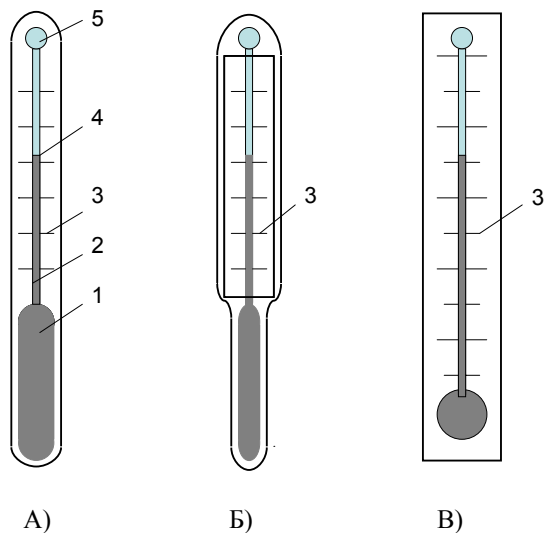


Рисунок 3.1 – Устройство и типы жидкостных стеклянных термометров:
 1 – основной резервуар, 2 – капилляр, 3 – шкала, 4 – уровень жидкости,
 5 – дополнительный резервуар

Стеклянные термометры могут применяться в качестве эталонов (палочные и с вложенной шкалой) и средств измерений общего назначения. В зависимости от условий эксплуатации термометры могут быть полного и частичного погружения.

Значения предела основной допускаемой погрешности стеклянных жидкостных термометров устанавливают в зависимости от диапазона измерений, цены деления и класса точности. В качестве примера в таблице 3.2 приведены эти значения для термометров общего назначения, измеряющих температуру в диапазоне от 0 до 100°C.

Таблица 3.2 – Погрешность стеклянных жидкостных термометров общего назначения (ГОСТ 28498-90)

Тип термометров	Цена деления, °С	Класс точности	Предел допускаемой основной погрешности, °С
Лабораторные термометры полного погружения	0,1	I класс	± 0,2
		II класс	± 0,3
	0,2	I класс	± 0,3
		II класс	± 0,4
	0,5	I класс	± 0,5
	1	I класс	± 1
2	I класс	± 2	
Лабораторные термометры частичного погружения	0,1	I класс	± 0,2
		II класс	± 0,6
	0,2	I класс	± 0,3
		II класс	± 0,6
	0,5	I класс	± 1
	2	I класс	± 2
Технические термометры	0,5	I класс	± 1
	1	I класс	± 1
	2	I класс	± 2
	5	I класс	± 5
	10	I класс	± 5
		II класс	± 10

К достоинствам стеклянных термометров следует отнести простоту эксплуатации, высокую точность и компактность, а также возможность использования в помещениях с повышенной опасностью. Их недостатки:

хрупкость, высокая токсичность ртути, невозможность дистанционных измерений.

3.2 Манометрические термометры

Их принцип действия основан на зависимости давления жидкости или газа, находящегося при постоянном объеме, от измеряемой температуры.

Температурный диапазон использования этих термометров от -200 до 650 °С. Нижний предел измерения обусловлен возможностью нахождения газа в газовой фазе, то есть до момента его конденсации в жидкость, а верхний предел измерения ограничен свойствами материалов, используемых для изготовления термометров. Минимальная погрешность, которую обеспечивают манометрические термометры, составляет $\pm 0,5$ °С.

Устройство манометрического термометра представлено на рисунке 3.2.

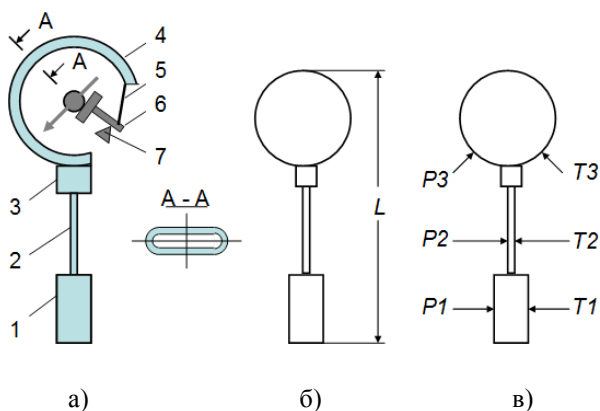


Рисунок 3.2 – а) устройство манометрического термометра:

1 – термобаллон, 2 – капилляр, 3 – основание манометра, 4 – упругий элемент, 5 – тяга, 6 – зубчатый сектор, 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).

Термометр содержит термобаллон 1 из нержавеющей стали или латуни объёмом от 0,1 до 1 дм³; капилляр 2 в виде толстостенной металлической трубки из нержавеющей стали, латуни или меди с внутренним диаметром 0,35 мм, наружным диаметром от 2 до 5 мм и манометрический прибор 3. Длина капилляра может составлять от 0,6 до 60 м. Она достаточна, чтобы обеспечить дистанционное измерение температуры. Такой капилляр можно прокладывать как провод по стенам, полу или потолку производственных и других помещений.

Давление, которое создаётся при измерении температуры в термобаллоне, передаётся по капилляру к манометрическому прибору. Это приводит к 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.

Жидкостные манометрические термометры заполняют в настоящее время силиконовым маслом (ПМС). Диапазон использования такого масла достаточно широк от -100 до 250°C . За пределами этого диапазона использование жидкостей для заполнения термометров затруднено и поэтому их заполняют газом (азотом или аргоном).

Термобаллон жидкостных и газовых манометрических термометров – это пустотелый цилиндр, полностью заполненный жидкостью или газом, к верхней части которого приваривают или припаивают капилляр. Существует ещё одна разновидность манометрических термометров, так называемые парожидкостные термометры. Термобаллон таких термометров заполняют примерно на $4/5$ объёма органической жидкостью, в которую погружают капилляр. В этом случае используют зависимость давления насыщенного пара, находящегося над поверхностью жидкости, от температуры.

Недостатком парожидкостных термометров является неравномерная шкала, обусловленная сильной нелинейностью зависимости давления пара от температуры, которая приводит к низкой чувствительности термометра в начале диапазона измерений. При более высоких значениях температуры, ближе к середине и концу диапазона, чувствительность резко возрастает. Однако достоинством таких термометров является независимость давления, насыщенного пара от внешнего давления. Благодаря этому исключается один из источников погрешности, характерных для жидкостных и газовых термометров.

Погрешность, обусловленную влиянием внешнего давления, называют – барометрической погрешностью. В обычных манометрических термометрах её влияние уменьшают за счёт высокого начального давления жидкости или газа (более 10 атм.), при котором заполняют систему термометра. Вторым специфическим источником погрешности манометрических термометров является, так называемая, гидростатическая погрешность. Она обусловлена тем, что во многих случаях термобаллон и манометрический прибор находятся на разных уровнях. Это, например, возможно, когда термобаллон находится в скважине или, наоборот, на верхнем этаже многоэтажного здания, а манометрический прибор – на уровне земли. В этих случаях, к давлению, которое задаётся измеряемой температурой, прибавляется или отнимается давление столба жидкости в капилляре, обусловленное разностью высот расположения термобаллона и манометрического прибора.

Достоинствами манометрических термометров по сравнению с жидкостными стеклянными термометрами является возможность, прежде всего, дистанционных измерений температуры. Второе достоинство – это возможность использования термометров в помещениях с повышенной опасностью. Они могут работать без применения электрических цепей и изготавливаются из материалов, исключающих искрообразование. К третьему достоинству можно отнести простоту конструкции и эксплуатации, а также высокую надёжность.

К недостаткам манометрических термометров в первую очередь относится невысокая точность измерений, соответствующая классам 1,0; 1,5; 2,5 и 4,0. Значительные размеры термобаллона, который является чувствительным элементом термометров, к сожалению, приводят к большой инерционности, то есть к запаздыванию их показаний при изменениях температуры. Эти запаздывание обусловлено необходимостью прогрева термобаллона, наполненного большим количеством жидкости, и может составлять более 10 минут. Другим недостатком является сложность или невозможность ремонта, в случае нарушения герметичности термометра. При этом, с учётом высокого давления в нём, термометрическая жидкость или газ мгновенно вытекают. Другая ситуация связана с тем, что капилляр может быть пережат при механическом воздействии. В этом случае давление, создаваемое измеряемой температурой в термобаллоне, не передаётся в манометрический прибор.

Тем не менее, манометрические термометры ещё используют во многих ситуациях, когда не требуется высокая точность измерений температуры и имеется необходимость проведения измерений в помещениях с повышенной опасностью. Необходимо отметить, что в качестве манометрического прибора, могут быть также использованы приборы с регистрацией температуры и возможностью их связи с компьютером.

3.3 Термометры сопротивления

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

$$R = R(T). \quad (3.1)$$

Их используют в диапазоне температур от -260 до 1100 °С с минимально достижимым значением погрешности $\pm 5 \cdot 10^{-5}$ °С. Они являются самыми точными средствами измерений температуры, составляющими

основу всех национальных эталонов в указанном, наиболее востребованном, диапазоне температуры.

Термометры сопротивления, в отличие от рассмотренных выше стеклянных и манометрических термометров, являются сложными устройствами, которые состоят, как минимум, из двух составных частей: термопреобразователя и вторичного измерительного прибора. Термопреобразователь, выполненный в виде изделия, называют *термодатчиком*. В нём происходит преобразование измеряемого значения температуры в выходной, как правило, электрический сигнал, который удобен для дистанционной передачи, обработки, отображения, регистрации и архивирования, также для управления устройствами автоматического регулирования температуры. Этот сигнал по измерительным линиям поступает на вход вторичных термометрических приборов. Для термопреобразователей сопротивления такими приборами являются измерительные приборы, измеряющие электрическое сопротивление.

Вторичный прибор, как правило, имеет отсчетное устройство, на котором отображаются измеренные значения в единицах температуры ($^{\circ}\text{C}$) или сопротивления (Om). 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 называют номинальными статическими характеристиками преобразования (НСХ).

Для стандартизованных типов термопреобразователей используют вторичный прибор, который имеет такую же характеристику преобразования. Это позволяет правильно преобразовать измеренные значения сопротивления в значения измеряемой температуры.

На рисунке 3.3 изображены датчик (термопреобразователь) и платиновый чувствительный элемент термометра сопротивления. В состав

датчика входит чувствительный элемент 1, защитный чехол 2, предохраняющий от механических и других 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 чувствительного элемента. Клеммная головка снабжена специальным патрубком 4, который позволяет герметизировать вывод проводов, идущих к вторичному прибору 8. Это позволяет исключить возможные воздействия внешней среды на электрические цепи датчика.

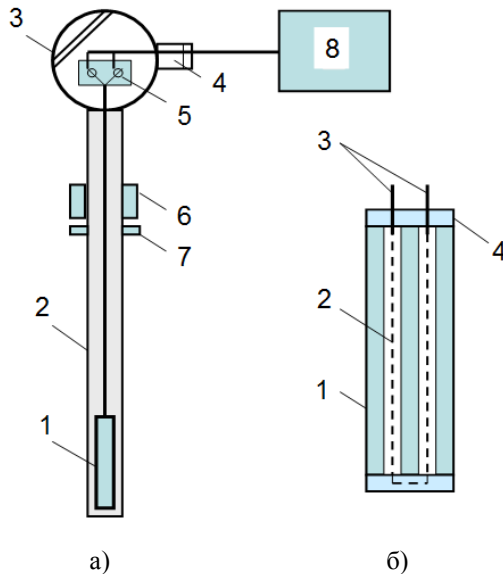


Рисунок 3.3 – Устройство термометра сопротивления – а) датчик:

1 – чувствительный элемент, 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 объекте измерения 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.

Защитный чехол изготавливают из тонкостенной нержавеющей трубки, которая имеет диаметр обычно от 5 до 30 мм и длину от 50 до 3000 мм. Его размеры определяют условиями конкретной измерительной задачи. Чехол, как правило, засыпают электроизоляционным порошком из окиси алюминия (Al_2O_3). Этот порошок выполняет несколько функций:

- осуществление теплового контакта стенки защитного чехла с чувствительным элементом;
- минимизацию влияния механических воздействий на чувствительный элемент вибрации, ударов и прочих механических воздействий;
- электроизоляцию внутренних электрических цепей датчика.

Чувствительный элемент из платиновой проволоки (рисунок 3.3, б) чаще всего изготавливают из двухканальной керамической трубки 1 диаметром от 2 до 5 мм и длиной от 30 до 50 мм. Трубка имеет два канала диаметром около 1 мм, в которые вставляют спираль 2 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 отрезков более толстой (0,5 мм) платиновой проволоки, которые вставляют на половину в каналы керамики, засыпают каналы пудрой из окиси алюминия и заливают их сверху эмалью. Засыпка служит, прежде всего, для предотвращения сползания и замыкания витков спирали. Кроме этого засыпка выполняет функции электроизоляции и защиты от механических воздействий, а также обеспечения теплового контакта витков спирали с керамическим корпусом чувствительного элемента.

К контактам чувствительного элемента в дальнейшем приваривают или припаивают провода, соединяющие его с клеммами головки датчика. Их изготавливают в зависимости от диапазона температуры, на который рассчитан датчик, из меди, никеля или серебра. Толщина этих проводов должна быть достаточно большой, чтобы исключить влияние их сопротивления на результат измерений сопротивления чувствительного элемента. Его сопротивление является основным информативным параметром при измерениях температуры и должно быть сосредоточено только в спирали чувствительного элемента.

Чувствительные элементы термопреобразователей сопротивления изготавливают из платины, меди и никеля, а также из полупроводниковых материалов. В России наибольшее распространение получили чувствительные элементы, изготовленные из платиновой или медной проволоки. Принято определять чистоту такой проволоки по значению относительного электросопротивления $W_{100} = R_{100} / R_0$, где R_{100} , R_0 – значения её сопротивления при 0°C и 100°C . Наиболее чистой проволоке соответствует наибольшее значение W_{100} . Например, для высокочистой платины оно достигает значения 1,3927.

Термопреобразователи с чувствительными элементами из платины являются самыми точными из всех преобразователей температуры. Их чувствительные элементы изготавливают из высокочистой платиновой проволоки намотанной в виде спирали, закреплённой на пластинке из кварцевого стекла. Для каждого эталонного термопреобразователя устанавливают индивидуальную характеристику преобразования измеряемой температуры T в значение W_T относительного электросопротивления. В качестве примера в приложении 6.2 приведены технические характеристики эталонного 2-го разряда термопреобразователя сопротивления ПТСВ-4.

Для преобразователей, относящихся к рабочим средствам измерений, установлены стандартные зависимости сопротивления чувствительных элементов от температуры. Их называют номинальными статическими

характеристиками преобразования (НСХ), которые приводят в виде таблиц или полиномов. Обозначения НСХ для преобразователей с чувствительными элементами из платины имеют вид: 1П, 5П, 10П, 50П, 100П, 500П, 1000П, где буква «П» обозначает «платина», а следующие за ней цифры указывают на сопротивление R_0 (Ом) чувствительного элемента при температуре 0 °С. Эти сокращённые обозначения наносят на табличку устройства термопреобразователя или на шкалу вторичного измерительного прибора, используемого для преобразования сигнала термопреобразователя в значения измеряемой температуры.

В качестве вторичных электрических приборов для термопреобразователей сопротивления применяют мосты ручного и автоматического уравновешивания, логометры и цифровые омметры, в том числе, микропроцессорные измерители сигналов термопреобразователей. Значения R_0 , а также допускаемых отклонений сопротивления чувствительных элементов от НСХ (°С) в зависимости от класса допуска А, В, или С по ГОСТ 6651 – 2009 приведены в таблице 3.3.

Платиновые термопреобразователи сопротивления используют в широком диапазоне температур от –260 до 1085°С. Они являются самыми точными и стабильными средствами современной термометрии. Термопреобразователи с чувствительным элементом из меди используют в диапазоне от –100 до 180°С. Они обеспечивают, в лучшем случае, погрешность $\pm 0,02^\circ\text{C}$ и менее стабильны, чем платиновые.

Таблица 3.3

Класс допуска	R_0 , Ом	Допускаемые отклонения ΔT в зависимости от температуры (Т), °С
А	50 \pm 0,025 100 \pm 0,050 500 \pm 0,250	$\pm 0,15 + 0,0021T$

В	50±0,050 100±0,100	±0,30+0,0051T
С	50±0,100 100±0,200	±0,60+0,00651T

Термометры сопротивления обеспечивают дистанционные измерения температуры с регистрацией и архивированием полученных результатов. Однако при этом необходимо принимать специальные меры для исключения влияния сопротивления проводов линии, соединяющей датчик с вторичным прибором, на результаты измерений.

3.4 Термоэлектрические термометры

Принцип действия термоэлектрических термометров основан на зависимости термоэлектродвижущей силы e (ТЭДС), возникающей в месте электрического контакта (соединения) двух разнородных проводников, от температуры T места их соединения:

$$e = e(T). \quad (3.2)$$

Такие термометры используют в диапазоне от -200 до 2500°C . Их минимальная погрешность равна $\pm 0,01^{\circ}\text{C}$.

Термоэлектрические термометры являются комплектом, состоящим из термоэлектрического термопреобразователя (термодатчика) и вторичного измерительного прибора, отображающего сигналы датчика в значениях температуры ($^{\circ}\text{C}$) или ТЭДС (мВ). Значения ТЭДС измеряют милливольтметрами или потенциометрами постоянного тока с пределом измерений до 50 мВ и классом точности от 0,0001.

Чувствительным элементом термометрических преобразователей температуры является термопара (рисунок 3.4 а). Она состоит из двух проводников (термоэлектродов 2) из разнородных металлов и сплавов, два

конца у которых имеют между собой электрический контакт (спай 1). Два других конца 3 термоэлектродов, называемых свободными концами, подключены к вторичному прибору (милливольтметру 4).

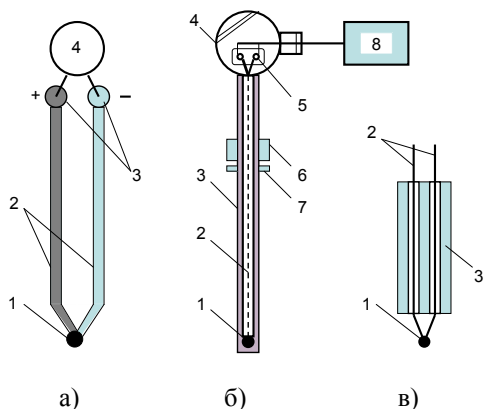


Рисунок 3.4 – Принцип действия и устройство термоэлектрических преобразователей: а) термопара: 1 – спай, 2 – термоэлектроды,

3 – свободные концы, 4 – милливольтметр;

б) термоэлектрический датчик: 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 является достаточно простым. Его изготовление заключается в образовании спаия, который может быть изготовлен путём пайки, сварки или даже скрутки. Важно, чтобы при этом был обеспечен надёжный электрический контакт между термоэлектродами. Диаметр термоэлектродов может быть от 0,03 до 5 мм, а их длина – неограниченной.

При нагревании спаия возникает термоэлектрический сигнал, пропорциональный измеряемой температуре. Его полярность зависит от

свойств термоэлектродов, один из которых является положительным, а другой – отрицательным.

Термоэлектроды термопары изолируют друг от друга двухканальной керамикой или отрезками керамической трубки, которые нанизывают на термоэлектроды в виде бус (рисунок 3.4 в). Всё это помещают в защитный чехол 3 термопреобразователя (рисунок 3.4 б), который изготавливают в виде пробирки из нержавеющей стали. Термоэлектроды 2 идут от спая 1 к головке 4 термопреобразователя, где находятся клеммы 5 для подключения вторичного прибора 8. Конструкция защитного чехла, головки термометра и клеммной колодки, как правило, такая же, как и у термодатчиков сопротивления. Чехол снабжен так же ограничительным кольцом 7 и гайкой 6, которая обеспечивает крепление датчика на объекте.

Связь ТЭДС с температурой зависит от физико-химических свойств термоэлектродов и не зависит от их диаметра, длины и характера распределения температуры вдоль них. К сожалению, значения ТЭДС зависят ещё и от температуры T_0 свободных концов термоэлектродов, которые присоединяют к медным удлинительным проводам или клеммам милливольтметра (вторичного прибора), измеряющего ТЭДС. Следовательно, в общем случае зависимость ТЭДС от температуры имеет вид

$$e = e(T, T_0). \quad (3.3)$$

Чем ближе значение температуры T_0 к измеряемой температуре, тем меньше сигнал (ТЭДС) термопары. Для получения однозначной зависимости e от T условились определять её при значении температуры T_0 свободных концов, равной 0°C (таяние льда). Для эталонных термоэлектрических термопреобразователей эту зависимость определяют индивидуально для каждого экземпляра преобразователя. Для наиболее распространённых типов термопреобразователей, используемых в качестве средств измерений,

установлены стандартные, усреднённые зависимости ТЭДС от температуры. Их также, как для термопреобразователей сопротивления, называют номинальными статическими характеристиками преобразования (НСХ).

В России наиболее распространены термопары из следующих пар термоэлектродов: платинородий (10%Rh) – платина (обозначение НСХ – ПП), платинородий (30%Rh) – платинородий (6%Rh) (ПР), хромель – алюмель (ХА), хромель – копель (ХК). Для самых высоких температур (до 2500°C) используют вольфрамрениевые термопары. Характеристики для этих термопар приведены в ГОСТ Р 8.585 – 2001 (Таблица 3.4)

Проверка термоэлектрических преобразователей осуществляется методом непосредственного сличения с эталонными термометрами в термостатах (до 250°C) и в печах (выше 100°C) или методом прямых измерений в реперных точках (до 1769°C) или в калибраторах температуры (до 650°C). При этом экспериментальным путём подтверждается соответствие отклонений ΔT значений T_x температуры, измеренных поверяемым термопреобразователем, от значений T_{Σ} температуры, измеренных эталонным термометром или воспроизведённых реперной точкой или калибратором.

Термометры на основе термоэлектрических термопреобразователей являются достаточно точными и стабильными средствами современной термометрии. Они могут обеспечивать погрешность, равную $\pm 0,01^\circ\text{C}$ и занимают третье место по точности после платиновых и ртутных термометров.

Таблица 3.4

НСХ	Название термоэлектродов	Диапазон, °С	Чувствительность, мкВ/ °С
ПП (S)	Платинородий (10%Rh) – платина	0 – 1300 (1600)	5 – 12
ПР (В)	Платинородий (30% Rh) – платинородий (6% Rh)	300 – 1600 (1800)	3 – 12
ХА (К)	Хромель (90% Ni, 10%Gr) – алюмель (94%Ni, 6%Al, Co)	– 200 – 1100 (1300)	15 – 42
ХК (L)	Хромель (90% Ni, 10%Gr) – копель (56%Cu, 44%Ni)	– 200 – 600 (800)	28 – 80
ВР (А)	Вольфрамрений (5% Re) – вольфрамрений (20%Re)	0 – 2200 (2500)	12 – 8

Термоэлектрические термометры обеспечивают дистанционные измерения температуры с регистрацией и архивированием полученных результатов. Однако при этом необходимо принимать специальные меры для учёта влияния температуры свободных концов термоэлектродов датчика при их соединении с вторичным прибором.

3.5 Вторичные термометрические приборы

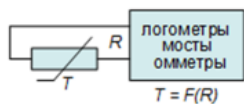
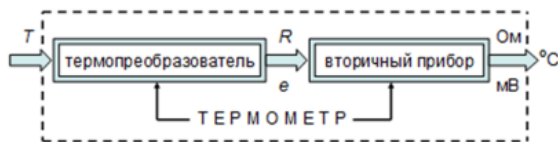
Возможность преобразования температуры в электрические величины позволяет осуществить отсчет её значений с помощью вторичных электрических измерительных приборов. Электрическими величинами, непосредственно связанными с измерениями температуры, являются сопротивление и ТЭДС термопреобразователей. Таким образом, измерения температуры в этом случае осуществляют комплектом средств измерений,

включающим последовательное соединение посредством линий связи первичного преобразователя и вторичного прибора (рисунок 3.5, а).

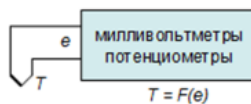
При этом вторичные приборы отображают значения измеряемой температуры или сопротивления и ТЭДС соответствующих термопреобразователей.

Отличительной особенностью вторичных термометрических приборов является то, что они работают с сигналами низкого уровня. Кроме этого, в них должен быть предусмотрен автоматический учёт неинформативных параметров, влияющих на первичный преобразователь, на линии связи и на вторичный прибор. В их состав входят узлы согласования термопреобразователя с измерительной схемой, которые выполняют функции усиления, нормирования, линеаризации, коррекции динамических характеристик преобразователей и фильтрацию помех.

а)



б)



в)

Рисунок 3.5 – Схема контактных электрических термометров:

- а) комплект термопреобразователь – вторичный прибор;
- б) вторичные приборы в термометрах сопротивления;
- в) вторичные приборы в термоэлектрических термометрах.

Выбор вторичных приборов определяют возможностями применения определенного типа термопреобразователей, диапазоном и погрешностью

измерений, быстродействием, необходимостью автоматической регистрации и обработки информации, условиями эксплуатации, а также их стоимостью.

В качестве вторичных приборов, работающих в комплекте с термометрическими преобразователями, чаще всего используют милливольтметры и потенциометры постоянного тока, а с термометрами сопротивления – логометры, мосты, омметры и потенциометры (рисунок 3.5) Эти приборы могут быть аналоговыми (шкальными) и цифровыми.

Первоначально для измерений сигналов термопреобразователей сопротивления и термоэлектрических преобразователей использовали и до сих пор используют простейшие приборы магнитоэлектрической системы. Их принцип действия основан на взаимодействии рамки с током, протекающим по намотанному на неё проводнику, с электрическим полем постоянного магнита. Такие магнитоэлектрические приборы, предназначенные для измерений высоких температур термоэлектрическими датчиками, часто называют пирометрическими милливольтметрами.

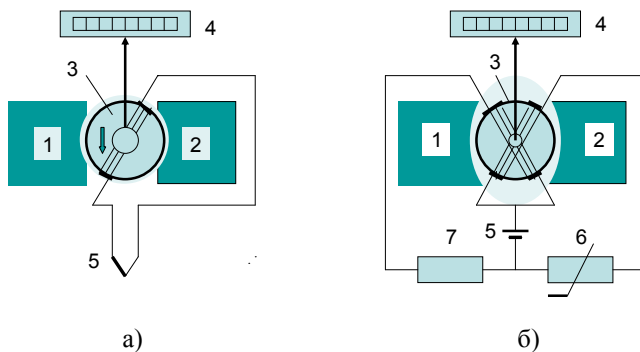


Рисунок 3.6 – Схемы вторичных термометрических приборов магнитоэлектрической системы:

- а) милливольтметр,
- б) логометр.

На рисунке 3.6. а) представлена схема милливольтметра. В его состав входит постоянный магнит с полюсами 1 и 2, подвижный сердечник 3, на котором закреплены рамка с катушкой провода и стрелка отсчетного устройства, шкала 4, которого отображает значение измеряемой температуры.

ТЭДС датчика является источником тока, который протекая по катушке, в результате взаимодействия с магнитным полем постоянного магнита, приводит во вращение сердечник. Чем выше измеряемая температура, тем больше ТЭДС, развиваемая термопарой, тем на больший угол поворачивается сердечник, и большую температуру показывает стрелка на шкале милливольтметра. Для того, чтобы предотвратить возможное вращение сердечника на его оси закреплена упругая спираль. При повороте сердечника она закручивается и создаёт противодействующий момент вращения, препятствующий моменту, который создаёт протекающий по катушке ток, взаимодействуя с полюсами магнита. Условием равновесия такой системы является равенство моментов силы электромагнитного взаимодействия и силы, создаваемой упругостью пружины.

Несколько более сложным является конструкция магнитоэлектрических приборов, предназначенных для измерений сопротивления датчиков температуры. Такие приборы называют логометрами (рисунок 3.6, б). Логометры, в отличие от милливольтметров, имеют сердечник 3 с двумя скрещенными токовыми рамками. По одной из этих рамок протекает ток, создаваемый источником 5 постоянного напряжения в электрической цепи, в которой находится чувствительный элемент 6 термопреобразователя. По другой рамке протекает ток из цепи, в которой находится опорный резистор 7 с постоянным значением сопротивления.

Особенностью логометров является неравномерность зазора между сердечником и полюсами магнита 1 и 2. В средней части, ближе к оси сердечника, зазор минимален, а на периферии полюсов зазор увеличивается. Таким образом, рамка, по которой протекает больший ток, стремится

повернуться в поле с меньшим зазором, а рамка, по которой протекает меньший ток, стремится в поле с большим зазором. Следовательно, угол закручивания сердечника пропорционален соотношению значений тока, протекающего в цепи термопреобразователя и цепи постоянного сопротивления. Равновесие, которое соответствует некоторому положению угла поворота сердечника и стрелки прибора, будет соответствовать равенству противоположно направленных моментов вращения, создаваемых взаимодействием токов в этих цепях с неоднородным полем магнита.

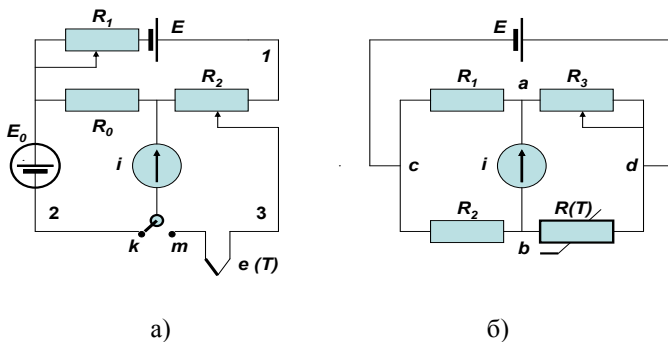


Рисунок 3.7 – Потенциометр и измерительный мост: а) схема потенциометра: E – источник питания, R_1 – переменный резистор, R_2 – постоянный резистор, R_3 – реохорд, E_0 – мера э.д.с., i – нуль-индикатор, $k-m$ – переключатель, $e(T)$ – термопреобразователь; б) схема моста: E – источник питания, $c-d$ – диагональ питания; $R_1, R_2, R_3, R(T)$ – плечи моста; R_1, R_4 – верхняя ветвь; $R_2, R(T)$ – нижняя ветвь; $a-b$ – измерительная диагональ, i – нуль-индикатор

Наиболее точным средством измерений сигналов термоэлектрических преобразователей являются потенциометры постоянного тока, принципиальная схема которых представлена на рисунке 3.7 а). Потенциометр состоит трёх контуров. В контуре 1 содержится источник постоянного напряжения E , переменный резистор R_1 , мера электрического

сопротивления R_0 и реохорд R_2 . В контуре 2 содержится мера электрического напряжения с точно известным значением E_0 (э.д.с.) и нуль-индикатор i , с помощью которого определяют отсутствие или наличие тока в электрической цепи. В контуре 3 содержатся переключатель ($k-m$) и клеммы для присоединения термоэлектрического преобразователя $e(T)$.

В положении « k » переключателя путём подбора сопротивления переменного резистора устанавливают такое значение тока i_0 в измерительном контуре 1, при котором ток через нуль-индикатор становится равным нулю. Это соответствует равенству падения напряжения на резисторе R_0 значению E_0 меры э.д.с.

$$i_0 R_0 = E_0. \quad (3.4)$$

В положении « m » подбирают такое сопротивление R_r реохорда, при котором ток через нуль-индикатор снова становится равным нулю. Это соответствует равенству падения напряжения U_r на реохорде значению $e(T)$ ТЭДС термоэлектрического преобразователя в контуре 3:

$$e(T) = U_r = i_0 R_r \quad (3.5)$$

С учётом (3.4) из этого равенства следует, что измеряемый сигнал прямо пропорционален значению R_r реохорда

$$e(T) = E_0 R_r / R_0, \quad (3.6)$$

В этом случае ТЭДС (сигнал) термопреобразователя компенсируется падением напряжения на реохорде, а, следовательно, ток в контуре 3 термопреобразователя равен нулю. В этом заключается компенсационный метод измерений, достоинством которого является независимость измеряемых значений ТЭДС преобразователя от сопротивления его термоэлектродов.

В качестве вторичных приборов к термопреобразователям сопротивления используют измерительные уравновешенные мосты. Принципиальная схема такого моста приведена на рисунке 3.7, б). Основой моста являются две параллельно соединённые ветви, содержащие по два сопротивления каждая. Электрический ток в этих ветвях задают с помощью элемента питания, подключенного к точкам *c* и *d* диагонали питания схемы моста. Между точками, *a* и *b* измерительной диагонали подключают нуль-индикатор, фиксирующий отсутствие тока между этими точками схемы. Отсутствие тока соответствует равенству произведений сопротивлений противоположных плеч моста

$$R_1 R(T) = R_2 R_4. \quad (3.7)$$

Из этого равенства измеряемое сопротивление термопреобразователя находят по формуле

$$R(T) = R_2 R_4 / R_1 \quad (3.8)$$

Такое состояние моста, при котором отсутствует ток через нуль-индикатор, называют равновесным. Особенностью равновесных мостов является независимость получаемых результатов измерений сопротивления от напряжения питания. От него зависит только чувствительность моста к изменению температуры (сопротивления) чувствительного элемента термопреобразователя.

В другой разновидности измерительных мостов вместо нуль-индикатора используют миллиамперметр. Значение тока, измеряемое в этом случае, пропорционально измеряемому сопротивлению. Однако, в этом случае, источник питания должен быть стабилизированным. Такие мосты называют неуравновешенными.

Приборы с ручным уравниванием используют в основном для исследовательских целей в лабораторной практике и при метрологических работах. Приборы прямого преобразования – магнитоэлектрические милливольтметры и логометры используют в случаях, определяемых соображением простоты эксплуатации и отсутствием высоких требований к точности измерений.

До настоящего времени ещё находят применение вторичные термометрические приборы следящего уравнивания. В частности, для измерений сигналов термоэлектрических преобразователей широко используют автоматические электромеханические потенциометры (рисунок 3.8). В основу их принципа действия положена схема уравновешенного моста, в котором вместо нуля-индикатора используют электронный усилитель, управляющий реверсивным двигателем. Такой двигатель изменяет направление вращения вала в зависимости от полярности тока, протекающего через измерительную диагональ моста. Кинематическая схема, управляемая двигателем, перемещает ползунок реохорда, связанный со стрелкой указателя измеряемых значений ТЭДС или температуры.

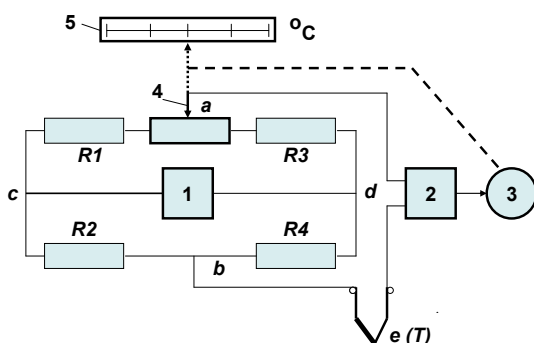


Рисунок 3.8 – Схема автоматического потенциометра:

1 – источник питания (стабилизированный), $c-d$ – диагональ питания, R_1-R_4 – плечи моста, $a-b$ – измерительная диагональ, 2 – усилитель, 3 – реверсивный двигатель, 4 – реохорд, 5 – шкала.

Такие потенциометры могут быть снабжены устройствами записи изменений температуры, многоканального измерения и регулирования. Их класс точности обычно не бывает менее 0,25.

Наиболее совершенными приборами для измерений температуры являются цифровые измерители сигналов преобразователей температуры. В качестве примера в приложении 6.2 приведены характеристики и измерительные возможности цифрового милливольтметра В2-99, который используют для измерений ТЭДС термоэлектрических термопреобразователей. В последнее время микропроцессорные цифровые вторичные приборы, предусматривающие возможность подключения термопреобразователей с различными номинальными и, даже, с индивидуальными характеристиками преобразования. Такие приборы отображают измеренные значения температуры с учётом соответствующих характеристик преобразования, а для термоэлектрических преобразователей автоматически вводят поправку на температуру свободных концов. Кроме этого, они могут отображать сигналы термопреобразователей в единицах электрического сопротивления или напряжения.

Структурная схема современного вторичного прибора приведена на рисунке 3.9, а технические характеристики одного из таких приборов приведены в приложении 6.3.

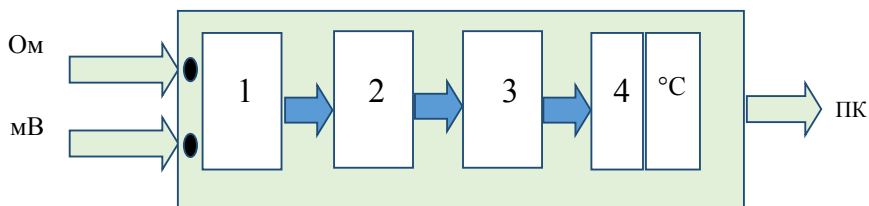


Рисунок 3.9 – Схема цифрового термометрического прибора:

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

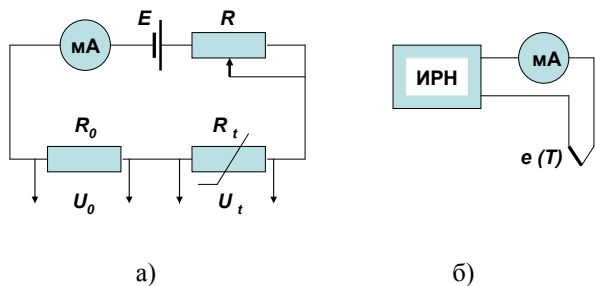


Рисунок 3.10 – Схемы потенциметрического (а) и компенсационного (б) методов

При выполнении наиболее точных измерений температуры, например, при эталонных работах, используют потенциметрический или компенсационный методы. Потенциметрическим методом измеряют сопротивления эталонных термопреобразователей сопротивления (рисунок 3.10, а). Схема, реализующая метод, содержит последовательно соединенные стабилизированный источник питания E , переменный резистор R , миллиамперметр, эталонную меру R_0 электрического сопротивления и термопреобразователь R_t сопротивления. С помощью переменного резистора в схеме устанавливают значение тока (по показаниям миллиамперметра), соответствующее паспортному значению термопреобразователя. Значения напряжения U_t и U_0 на потенциальных выводах термопреобразователя и эталонной меры измеряют потенциометром или прецизионным милливольтметром. Искомое значение R_t сопротивления рассчитывают по формуле

$$R_t = U_t U_0 / R_0. \tag{3.9}$$

При использовании такого метода измерений сопротивлений термопреобразователя необходимо наличие у его чувствительного элемента токовых и потенциальных выводов.

Примером нулевого метода измерения может служить компенсационный метод измерения термо-ЭДС источником регулируемого напряжения (ИРН) (рисунок 3.10, 6). Нулевой метод обеспечивает высокую точность измерения, определяемую, в основном, точностью задания известной величины. Основное преимущество компенсационного метода измерения термо-ЭДС. состоит в том, что в момент полной компенсации ток в цепи термопары равен нулю. Это означает, что величина сопротивления соединительных линий между потенциометром и термоэлектрическим термометром не влияет на результат измерения.

Таким образом, определение термо-ЭДС. термоэлектрического термометра сводится к измерению сопротивления R_p . Шкала ИРН, нанесенная вдоль реохорда R_p , проградуирована непосредственно в мВ. Сопротивление гальванометра и внешней соединительной линии не оказывает влияния на результаты измерений.

4 Радиационная термометрия

4.1 Основы теории

Радиационная термометрия основана на законах теплового электромагнитного излучения нагретых тел, используемых в бесконтактных средствах измерений температуры, обычно называемых пирометрами. Пирометры (от греческого «пирос» – огонь) первоначально использовались только при измерениях высоких температур (выше 600°C), при которых свечение нагретых тел становится видимым для человеческого глаза.

Принцип действия пирометров основан на зависимости яркости I или плотности потока q теплового излучения нагретых тел от их температуры T .

В первом случае используют зависимость $I=I(T)$, основанную на законе Планка. Эта зависимость, как следует из закона, не является однозначной, так как яркость тел зависит ещё и от длины волны. Максимальная яркость при температуре T соответствует длине λ_{\max} теплового излучения, которая определяется законом «смещения» Вина:

$$\lambda_{\max} \cong \frac{2800}{T} \text{ (мкм)}, \quad (4.1)$$

где T – значение температуры излучателя, К.

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

Такие низкотемпературные бесконтактные измерители температуры уже не соответствуют первоначальному термину «пирометры» (измерители температуры огня). Поэтому сейчас средства измерений температуры, реализующие бесконтактный метод, принято называть обобщающим

термином – радиационные термометры, а высокотемпературные радиационные термометры – пирометрами.

4.2 Яркостные термометры (пирометры)

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 учётом этого такие пирометры называют яркостными монохроматическими.

Принципиальная схема классического яркостного пирометра, приведена на рисунке 4.1. Излучение от нагретого объекта 1, имеющего температуру T_x и яркость I_x , проходит через объектив 2, 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.

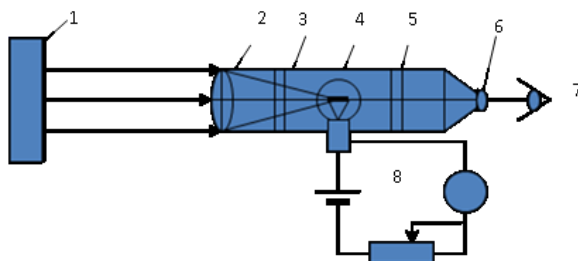


Рисунок 4.1 – Устройство и принцип действия яркостного монохроматического пирометра: 1 – объект; 2 – объектив; 3 – поглощающий светофильтр; 4 – пирометрическая лампа; 5 – красный светофильтр; 6 – окуляр; 7 – глаз; 8 – регулятор тока

Пирометрическая лампочка включена в электрическую цепь регулятора тока 8, содержащую источник питания, измеритель тока и переменный резистор, изменяя сопротивление, которого можно регулировать температуру нити накала лампочки. Пирометрическая лампочка выполняет функцию встроенного эталона-носителя 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 задаёт значение её температуры. Это значение можно найти по зависимости тока от температуры, используя показания измерителя тока, или по шкале переменного резистора, градуированного в °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 зрения оператора яркость объекта.

Яркостные пирометры обычно используют для измерений температуры в диапазоне от 400 до 6000°С и выше. Их минимальная погрешность составляет 0,5°С.

4.3 Радиационные термометры полного и частичного излучений

Другой распространённой разновидностью бесконтактных средств термометрии являются термометры (пирометры) полного или частичного излучения. 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 или наиболее интенсивной его части.

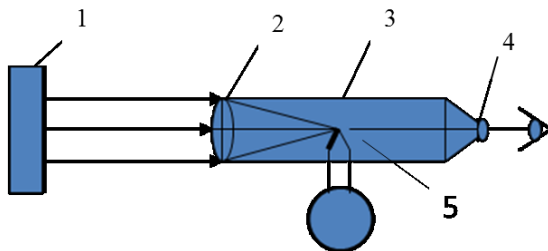


Рисунок 4.2 – Устройство и принцип действия радиационного пирометра:

1 – объект, 2 – объектив, 3 – корпус, 4 – окуляр, 5 – спай термопары

Устройство таких пирометров представлено на рисунке 4.2.

Объект измерения 1 излучает тепловой поток плотностью q , который в соответствии с законом Стефана-Больцмана пропорционален четвертой степени абсолютной температуры объекта. Объектив 2 концентрирует излучение объекта на чувствительном элементе 3, которым может служить спай термопары 5. Чем выше температура объекта, тем выше плотность потока теплового излучения с его поверхности и тем сильнее нагревается спай термопары. Её сигнал измеряют милливольтметром, который может быть отградуирован в значениях температуры. Окуляр 4 служит для наведения пирометра на объект.

Спектральный диапазон таких пирометров определяется спектральными характеристиками объектива и чувствительного элемента. Радиационные пирометры используют в диапазоне температур от -70 до 2500 °С. Их погрешность обычно превышает ± 1 °С.

Основными преимуществами радиационных термометров являются: бесконтактность, самый широкий из всех термометров диапазон измерений и высокое быстродействие.

Главным недостатком радиационных термометров является зависимость их погрешности от состояния и физико-химических свойств поверхности объекта измерений, а также от оптических свойств среды, через которую проходит излучение. Поэтому измеренную яркостным термометром температуру называют яркостной, а измеренную термометром полного или частичного излучения – радиационной температурой. Значения этих температур могут значительно отличаться от действительной температуры объекта. Поэтому в современных радиационных термометрах предусмотрена возможность корректировки показаний с учётом свойств объекта измерений.

5 Поверка средств термометрии

5.1 Государственная поверочная схема для средств измерений температуры

Порядок передачи единицы температуры от государственного первичного эталона средствам измерений определяет государственная поверочная схема, установленная в ГОСТ 8.558 – 2009. Эта поверочная схема является межгосударственной (для стран СНГ) и введена в действие с июля 2012 г. Схема состоит из трёх частей, которые распространяются на контактные термометры в диапазоне от 0,3 до 273,16 К (от минус 272,85°С до 0,01°С), на контактные термометры от 273,15 до 3273,15 К (от 0°С до 3000°С) и на радиационные термометры от 220 до 100273,15 К (от минус 53,15°С до 100000°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 передаёт единицу температуры эталонам-копиям, эталонам 0-го, 1-го, 2-го и 3-го разрядов, а затем – средствам измерений температуры. Таким образом, осуществляется прослеживаемость передачи единицы температуры к средствам измерений от первичного эталона.

Эталонный комплекс ГПЭ – I включает в себя установки для реализации низкотемпературных реперных точек МТШ – 90, 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 не исключённой систематической погрешности (для первичных эталонов её устанавливают расчётом на основе теоретического анализа её 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 платиновых термопреобразователей, термостаты сравнения, прецизионные средства измерений сопротивления и давления, а также для воспроизведения, хранения и передачи единицы температуры бесконтактными методами. На границах диапазона воспроизводимых значений температуры (0 и 961,78 °С) комплекс обеспечивает среднее квадратическое отклонение результата измерений ($n = 5$, $P = 0,99$) от 0,03 до 1,2 мК при не исключённой систематической погрешности от 0,04 до 1,7 мК.

Передачу единицы контактными средствами термометрии выше температуры реперной точки затвердевания серебра (961,78 °С) осуществляется с помощью моделей АЧТ и температурных ламп, а также с помощью высокотемпературных реперных точек и эталонных термоэлектрических преобразователей на более низких ступенях поверочной схемы. На верхней границе диапазона передаваемых значений температуры (1769°С) вторичный эталон температуры обеспечивает среднее квадратическое отклонение результата его сличений с первичным эталоном, равное 0,5 К. Эталон 2-го разряда при температуре 2500°С обеспечивает доверительную погрешность ($P = 0,95$), равную 10 К. Пределы допускаемой погрешности контактных средств термометрии, обеспечиваемых эталонным комплексом ГПЭ – II, составляют от 3 мК при 0°С до 30 К при 3000°С.

Передача единицы температуры осуществляется двумя методами: методом прямых измерений и методом непосредственного сличения. Метод прямых измерений основан на использовании источников температуры с известным значением. В качестве таких источников используют однозначные и многозначные меры температуры. Однозначные меры температуры реализуются при фазовых переходах чистых веществ в ампулах реперных точек международной шкалы температур. Реперные точки являются

источником постоянных во времени и известных значений температуры. Многозначные меры температуры реализуют в калибраторах. Калибратор – это устройство, в котором с помощью автоматического регулирования задают эталонным термометрам значение необходимой температуры и поддерживают его постоянным в течение времени, достаточного для поверки термометров. Значения задаваемой температуры, в этом случае, могут быть различными. Поэтому калибратор относят к многозначным мерам температуры, значения которой могут быть заданы произвольно.

При передаче единицы методом прямых измерений поверяемый или аттестуемый термометр погружают в ампулу реперной точки или в измерительный блок калибратора, температура которых стабильна и известна с высокой точностью. В методе непосредственного сличения используют устройства, предназначенные для создания постоянной во времени и однородной в пространстве температуры. Значения этой температуры определяют по показаниям эталонного термометра. При этом погрешность поверяемого (аттестуемого) термометра определяют 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 реализуются при фазовых переходах различных веществ, температура которых в процессе поверки остаётся постоянной, но значение её неизвестно. Примером таких постоянных точек являются температуры таяния льда и кипения воды. При этих фазовых переходах воды происходит стабилизация температуры, но её значение зависит от параметров внешней среды и от чистоты воды. Поэтому для точного определения её значения необходимо использовать эталонные термометры.

Термостаты – это устройства, предназначенные для создания постоянной во времени и однородной в пространстве температуры, значение

которой поддерживается постоянным в заданном диапазоне температур. При этом значение температуры также необходимо определять с помощью эталонного термометра. Термостаты используют обычно до температуры 600 °С. При более высоких температурах используют для передачи единицы методом непосредственного сличения электронагревательные печи. Их температура поддерживается на заданном уровне с помощью автоматического регулирования. Однородность температуры, необходимая для равенства значений температуры поверяемых и эталонного термометров, обеспечивают при этом с помощью высокотеплопроводного металлического блока, в котором размещают чувствительные элементы термометров.

При поверке радиационных термометров используют модели АЧТ – устройства, обеспечивающие сличение их показаний с показаниями контактного эталонного термометров. Для поверки яркостных пирометров используют также температурные лампы – многозначные меры температуры.

5.2 Методы и средства поверки

Рассмотренная государственная поверочная схема для средств измерений температуры предусматривает два основных метода передачи единицы температуры – метод прямых измерений и метод непосредственного сличения. Для реализации метода прямых измерений в области контактной термометрии используют эталонные меры – источники, воспроизводящие и передающие значения температуры с высокими и гарантированными показателями точности. К таким мерам относятся, прежде всего, естественные источники в виде реперных точек температурной шкалы, а также калибраторы температуры. Для реализации метода непосредственного сличения, основанного на сравнении показаний поверяемых и эталонного термометров, обычно используют жидкостные термостаты и горизонтальные трубчатые печи.

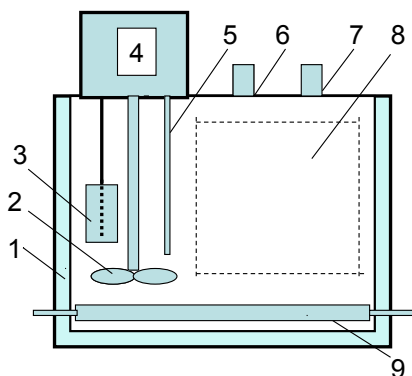


Рисунок 5.1 – Схема жидкостного термостата:

1 – корпус, 2 – мешалка, 3 – нагреватель, 4 – электронный блок,
 5 – контрольный термопреобразователь, 6 – гнездо для эталонного
 термометра, 7 – гнездо для поверяемых термометров
 (термопреобразователей), 8 – рабочая камера, 9 – теплообменник

Основная задача термостата – это создание неизменной во времени и однородной температуры в его рабочей камере. Для этого в его корпус 1 (рисунок 5.1) заливают термостатирующую жидкость. В качестве такой жидкости используют воду (от 0 до 100°C), спирт (от – 50 до +30°C), тосол (от – 30 до 150°C), силиконовое (полиметилсилоксановое) масло (от – 100 до 250°C), расплавленное олово (от 250 до 650°C). В последние годы появились термостаты, заполняемые порошком из окиси алюминия (Al_2O_3).

Внутри корпуса расположена мешалка 2, вращение которой обеспечивает перемешивание жидкости и получение однородности её температуры. Нагреватель 3 подключен к выходу регулятора температуры, расположенного в электронном блоке 4. Регулятор, управляя по сигналу термопреобразователя 5 мощностью нагревателя, обеспечивает задание и поддержание постоянства необходимого значения температуры термостата. В электронном блоке размещают также двигатель мешалки и вторичный

прибор к контрольному термопреобразователю 5, отображающий заданные и текущие значения температуры термостата.

В крышке термостата имеются гнезда 6 и 7 для установки эталонного и поверяемых термопреобразователей (термометров) в рабочую камеру 8. Эталонный термометр служит для определения действительной температуры рабочей камеры, которая в общем случае отличается от температуры, определяемой контрольным термопреобразователем.

Теплообменник 9 служит для ускоренного охлаждения термостата и получения в нём низких температур пропусканием по нему хладагента от внешнего источника. Необходимо отметить, что устройства для получения стабильных и однородных низких температур называют криостатами.

Современные термостаты обеспечивают стабильность и однородность температуры в рабочей камере на уровне нескольких тысячных кельвина. Их важными эксплуатационными характеристиками являются также объём и глубина рабочей камеры. В качестве примера в приложении 6.4. приведены технические характеристики термостата «Термотест-150».

При поверке термопреобразователей их устанавливают вместе с эталонным термометром в гнезда термостата и определяют погрешность по отклонению их показаний от значения температуры рабочей камеры, определяемой эталонным термометром.

Метод сличения при поверке в области высоких температур (выше 250°C) традиционно реализуют в горизонтальных трубчатых печах (рисунок 5.2). Выравнивающий блок 1 из теплопроводного жаропрочного металла или сплава, содержащий каналы для размещения эталонного 6 и поверяемых термопреобразователей, устанавливают в средней части керамической трубы 3, снабжённой электрическим нагревателем. Задание и поддержание необходимого значения температуры печи осуществляется автоматическим регулятором 5 путём управления мощностью нагревателя. Погрешность поверяемых термопреобразователей находят по отклонению их сигналов от сигнала эталонного преобразователя, измеряемого вторичным прибором 7.

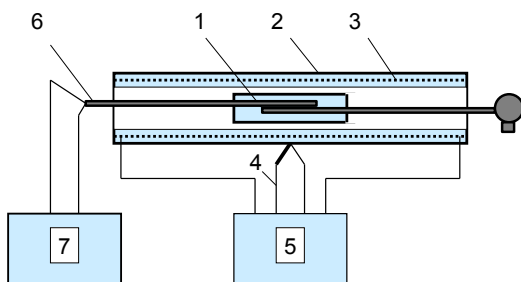


Рисунок 5.2 – Горизонтальная поверочная печь:

1 – выравнивающий блок, 2 – теплоизолированный корпус, 3 – керамическая труба с электронагревателем, 4 – контрольная термопара, 5 – регулятор температуры, 6 – эталонный термопреобразователь, 7 – вторичный прибор

В последние годы всё большее распространение получают калибраторы температуры, выполняющие функцию эталонных источников заданных значений температуры (рисунок 5.3). Их обычно используют в диапазоне от 50 до 600° С в качестве многозначных мер температуры 2-го и 3-го разрядов. Погрешность значений температуры, воспроизводимых калибраторами, составляет от одной до нескольких сотых градуса Цельсия.

Калибратор содержит измерительный блок 1 с термометрическими каналами 2 для размещения в них поверяемых термопреобразователей. Для получения однородного температурного поля блок изготавливают из металла с высокой теплопроводностью и окружают теплоизоляцией 3. Задание и поддержание постоянным необходимого значения температуры осуществляет автоматический регулятор, расположенный в блоке 5, по сигналу термопреобразователя 6 путём управления мощностью нагревателя 4. В блоке 4 расположен также вторичный прибор термопреобразователя 6, отображающий значение воспроизводимой калибратором температуры на цифровом индикаторе.

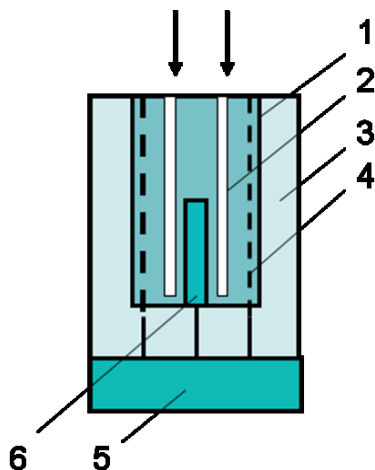


Рисунок 5.3 – Устройство калибратора температуры:

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

При поверке термопреобразователей их помещают в термометрические каналы калибратора и определяют погрешность по отклонению их показаний от значения температуры, отображаемого на цифровом индикаторе. Сами калибраторы поверяют (аттестуют) с помощью эталонных платиновых термометров или мер температуры более высокого разряда.

В качестве примера в приложении 6.5 приведены технические характеристики калибратора «КТ – 500».

Универсальным средством передачи единицы температуры в области радиационной термометрии являются тепловые излучатели в виде моделей абсолютно чёрного тела и температурные лампы. Абсолютно черное тело (АЧТ) в идеальном случае представляет собой нагретую полость с отверстием, площадь которого пренебрежимо мала по сравнению с площадью поверхности излучающей полости. Излучение АЧТ строго

описывается законами Планка, Вина и Стефана-Больцмана, являющимися теоретической основой радиационной термометрии.

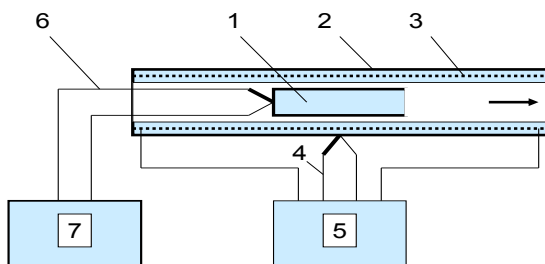


Рисунок 5.4 – Модель АЧТ:

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

Важным условием соответствия свойств излучения АЧТ этим законам является постоянство и однородность температуры по всей поверхности излучающей полости (рисунок 5.4).

Особенностью АЧТ, которую используют при поверке, является то, что при заданной температуре значения яркости его отверстия и плотности потока излучения, выходящего из него, являются хорошо воспроизводимыми.

Близость свойств излучения реальных тел к свойствам АЧТ определяется коэффициентом черноты ε , который равен отношению яркости или плотности потока излучения реального тела к соответствующим характеристикам излучения АЧТ. У идеального АЧТ $\varepsilon = 1$, а у реальных тел этот коэффициент изменяется в диапазоне от $0 < \varepsilon < 1$. Например, плоская полированная и не окисленная поверхность алюминия ($\varepsilon = 0,03$) имеет яркость и поверхностную плотность радиационного теплового потока примерно в 33 раза меньше, чем отверстие в полости, выполненной из того же алюминия ($\varepsilon \approx 1$). Ориентировочные значения коэффициента

ε различных объектов, как правило, приводятся в справочных таблицах руководства по эксплуатации пирометров.

Реализация АЧТ в виде моделей с различными конфигурациями полостей, предназначенных для поверки пирометров, должны иметь $\varepsilon > 0,98$. Такие излучатели используют в качестве эталонов при передаче единицы температуры радиационным термометрам методом прямых измерений. Температуру моделей АЧТ измеряют в зависимости от диапазона эталонными контактными термометрами или пирометрами.

Технические характеристики модели АЧТ приведены в приложении 6.6.

Температурные лампы являются многозначными эталонными мерами температуры. Принцип их действия основан на зависимости яркости вольфрамовой ленты от значения, протекающего по ней тока. Такие лампы используют при поверке и калибровке яркостных пирометров в диапазоне от 800 до 2500 °С. Минимальная погрешность значений температуры, воспроизводимых лампами, составляет $\pm 0,5$ К.

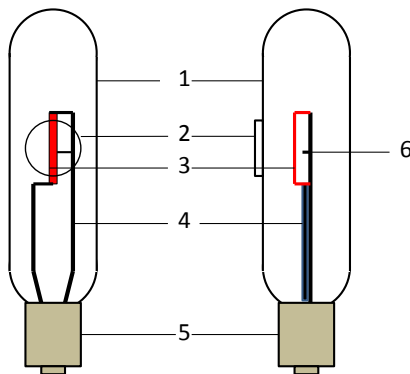


Рисунок 5.5 – Температурная лампа:

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

Температурная лампа (рисунок 5.5) является вакуумной или газонаполненной лампой накаливания и содержит стеклянную колбу 1 с

увиолевым окном 2, хорошо пропускающим видимую область спектра теплового излучения. Внутри лампы расположено тело накала в виде вольфрамовой ленты 3, толщиной 0,04 мм, длиной 25 мм и шириной 3 мм. Лента приварена к электродам 4, по которым к ней подводят электрический ток. Рабочий участок ленты, на который визируют пирометры при поверке, отмечен индексом 6 – отрезком тонкой вольфрамовой проволоки, приваренной к одному из электродов. Питание лампы осуществляют постоянным электрическим током (от 10 до 30 А), который подводят от стабилизированного источника питания через цоколь 5, соединенный с электродами.

Регулируя ток в лампе, изменяют температуру ленты, а, соответственно, и её яркость. Зависимость температуры ленты от тока определяют с использованием эталонных моделей АЧТ при выпуске лампы из производства и в процессе её аттестации в качестве меры температуры.

5.3 Поверка жидкостных стеклянных и манометрических термометров

Поверку стеклянных жидкостных термометров проводят в соответствии с ГОСТ 8.279 – 78 методом прямых измерений в нулевом термостате (температура таяния льда), в ампуле тройной точки воды или методом непосредственного сличения в термостатах и криостатах.

В качестве эталонов применяют платиновые термометры сопротивления и ртутные стеклянные термометры 2-го и 3-го разрядов, которые выбирают в соответствии с ГОСТ 8.558 – 2009.

Установка для поверки жидкостных стеклянных термометров состоит из жидкостного термостата 1, в рабочем пространстве которого размещают поверяемый термометр 1 и эталонный 2 термопреобразователь. Для измерений сопротивления (температуры) чувствительного элемента термопреобразователя используют измеритель 4, выход которого соединён с

компьютером 5, отображающим и регистрирующим измеренные значения температуры.

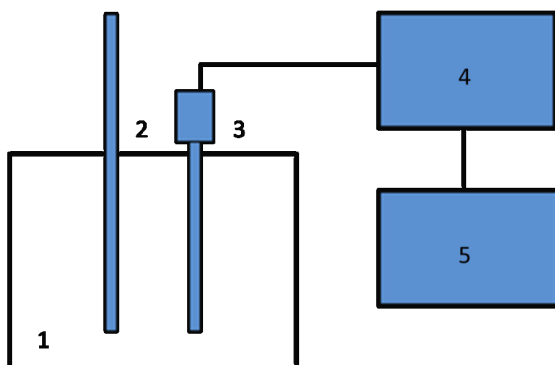


Рисунок 5.6 – Схема поверочной установки:

1 – жидкостный термостат, 2 – поверяемый термометр, 3 – эталонный термопреобразователь, 4 – вторичный измерительный прибор, 5 – компьютер

При поверке поверяемый термометр погружают в термостатирующую жидкость на глубину, указанную на нём (рисунок 5.6). При отсутствии указания о глубине погружения термометр устанавливают так, чтобы высота выступающего над поверхностью жидкости столбика не превышала 10 мм. В противном случае вводят поправку на выступающий столбик.

Отсчет показаний термометров проводят после выдержки при измеряемой температуре не менее 10 мин. Поверку проводят при постоянной температуре в термостате.

При каждом оцифрованном значении температуры у термометров с ценой деления $0,05\text{ }^{\circ}\text{C}$ и менее осуществляют шесть отсчетов, у остальных – три отсчета.

Для получения результата поверки рассчитывают погрешность в следующей последовательности. Находят среднее арифметическое значение

показаний поверяемого термометра t_{cp} . Для термометров с ценой деления $0,05^{\circ}\text{C}$ и более рассчитывают погрешность по формуле

$$\Delta t = t_{CP} - t_D, \quad (5.1)$$

где t_D – действительное значение температуры, определяемое по показаниям эталонного термометра.

Для термометров с ценой деления $0,02^{\circ}\text{C}$ и менее погрешность определяют по формуле

$$\Delta t = (t_{CP} + \Delta t_P) - t_D, \quad (5.2)$$

где Δt_P – поправка к показаниям поверяемого термометра, обусловленная влиянием атмосферного давления,

$$\Delta t_P = \beta_E (P - P_0), \quad (5.3)$$

где β_E – коэффициент атмосферного давления термометра $^{\circ}\text{C}/\text{Па}$ ($^{\circ}\text{C}/\text{мм.рт.ст.}$ или $^{\circ}\text{C}/\text{мбар}$), приведённый в паспорте на термометр; P – значение атмосферного давления при измерении; P_0 – нормальное атмосферное давление, равное 101325 Па (760 мм рт. ст. или $1013,25 \text{ мбар}$).

Поправку на выступающий столбик рассчитывают по формуле

$$\Delta t_{CT} = \gamma(t - t_I)n, \quad (5.4)$$

где γ – коэффициент видимого теплового расширения термометрической жидкости в стекле; t_I – средняя температура выступающего столбика по показаниям вспомогательного термометра; n – число градусных отметок, соответствующее высоте выступающего столбика.

Полученные значения погрешности не должны превышать предела допускаемой основной погрешности для данного типа термометров.

При выполнении поверки необходимо экспериментально определить соблюдение этого условия для поверяемого термометра при заданных значениях температуры и принять решение о возможности его применения в сфере государственного регулирования обеспечения единства измерений.

Поверку манометрических термометров также осуществляют методом непосредственного сличения с эталонными термометрами в термостатах или печах по ГОСТ 8.305 – 78.

5.4 Поверка термопреобразователей сопротивления

В соответствии с частью 2 Государственной поверочной схемы для средств измерений температуры (ГОСТ 8.558 – 2009) поверку термопреобразователей сопротивления осуществляют методом непосредственного сличения с эталонными термометрами 3-го разряда, например, в термостате. При этом экспериментальным путём определяют отклонения ΔT измеряемых поверяемым термопреобразователем значений T_X температуры от значений T_O температуры эталонного термопреобразователя. Для платиновых термопреобразователей эти отклонения не должны превышать значений, указанных в таблице 3.3. Например, для термопреобразователей класса А, имеющих НСХП 100П, допускаемые отклонения должны удовлетворять условию

$$\Delta T = | T_X - T_O | \leq 0,15 + 0,002 | T_O | . \quad (5.5)$$

При выполнении поверки необходимо экспериментально подтвердить соблюдение этого условия.

Установка для поверки термопреобразователей сопротивления состоит из жидкостного термостата 1, в рабочей камере которого размещают поверяемый 1 и эталонный 2 термопреобразователи. Для измерений

сопротивления чувствительных элементов термопреобразователей используют измеритель 4, выход которого соединён с компьютером 5, отображающим и регистрирующим измеренные значения температуры.

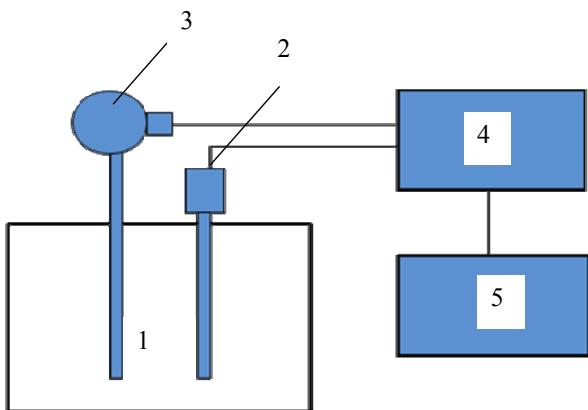


Рисунок 5.7 – Схема поверочной установки:

1 – жидкостный термостат, 2 – поверяемый термопреобразователь, 3 – эталонный термопреобразователь, 4 – вторичный прибор – измеритель сигналов термопреобразователей, 5 – компьютер

При определении погрешности (рисунок 5.7) поверяемых термопреобразователей в термостате устанавливают значение температуры, равное нижнему пределу их измерений. Термопреобразователи подключают к вторичному прибору, предварительно установив на нём характеристики преобразования, соответствующие поверяемым и эталонному термопреобразователям. После наступления стационарного температурного режима термопреобразователей, при котором скорость изменения их температуры не превышает, например, $0,02^{\circ}\text{C}$ в минуту, измеряют с помощью эталонного термопреобразователя точное значение T_{01} температуры термостатирующей жидкости в рабочей камере. При этом фиксируют и заносят в протокол соответствующие этой температуре

значения T_{X1} температуры, измеренные каждым поверяемым термопреобразователем.

Эти операции повторяют при значениях температуры термостатирующей жидкости, соответствующих, как минимум, середине и верхнему пределу диапазона измерений поверяемых термопреобразователей, фиксируя и занося в протокол соответствующие значения T_{02} , T_{X2} , T_{03} , T_{X3} . Затем по формулам, приведённым в таблице 3.3, рассчитывают для конкретных типов поверяемых преобразователей значения допусков ΔT_1 , ΔT_2 , ΔT_3 , соответствующие значениям T_{01} , T_{02} , T_{03} температуры, при которых проводили поверку и проверяют выполнение условий

$$\begin{aligned} |T_{X1} - T_{01}| &\leq \Delta T_1, \\ |T_{X2} - T_{02}| &\leq \Delta T_2, \\ |T_{X3} - T_{03}| &\leq \Delta T_3. \end{aligned} \quad (5.6)$$

В зависимости от того, соблюдаются ли эти условия, принимают решение о соответствии поверяемых термопреобразователей требованиям ГОСТ 6651-2009 и результатах их поверки.

5.5 Поверка термоэлектрических преобразователей

В соответствии с частью 2 Государственной поверочной схемы для средств измерений температуры (ГОСТ 8.558 – 2009) поверка термоэлектрических преобразователей в диапазоне от 0 до 2500°C осуществляют методом непосредственного сличения с эталонными термометрами 3-го разряда, например, в термостатах (до 250°C), в печах (выше 250°C) или методом прямых измерений в калибраторах температуры (до 650°C). При этом экспериментальным путём подтверждается соответствие отклонений ΔT значений T_X температуры, измеренных поверяемыми термопреобразователями, от значений T_0 температуры, измеренных эталонным термометром или воспроизведённых калибратором.

Например, для термопреобразователей ХА класса 2 при температуре 400°С допускаяемые отклонения ΔT должны удовлетворять условию

$$| \Delta T | = | T_x - T_0 | \leq 2,7^\circ\text{C} . \quad (5.7)$$

При выполнении поверки необходимо экспериментально подтвердить соблюдение условия (5.7) для поверяемого термоэлектрического преобразователя и принять решение о возможности его применения в сфере государственного регулирования обеспечения единства измерений.

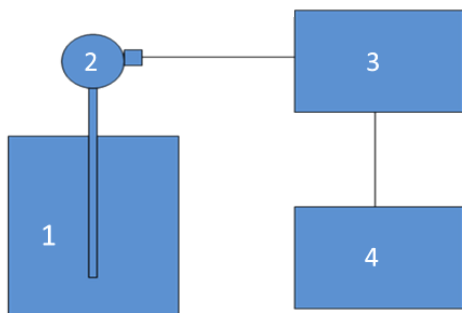


Рисунок 5.8 – Схема поверочной установки с использованием калибратора:

1 – калибратор, 2 – поверяемый термопреобразователь, 3 – вторичный прибор, 4 – компьютер

Определение действительных метрологических характеристик термоэлектрических преобразователей методом прямых измерений в калибраторе температуры проводят на установке, схема которой приведена на рисунке 5.8. Установка состоит из калибратора температуры 1, в тепловом блоке которого размещают поверяемый термопреобразователь 2. Для измерений его ТЭДС используют вторичный прибор – измеритель сигналов 3, выход которого подключен к компьютеру 4.

При проведении поверки в калибраторе устанавливают значение температуры, равное нижнему пределу диапазона температур, измеряемых поверяемыми термопреобразователями. В тепловой блок калибратора устанавливают поверяемые термопреобразователи и подключают их к соответствующему вторичному прибору. При наступлении стационарного температурного режима термопреобразователей фиксируют и заносят в протокол значение T_0 температуры калибратора, которое высвечивается на его индикаторе, а также соответствующие этой температуре значения T_{X1} , измеренные поверяемыми термопреобразователями.

После этого повторяют эти операции при значениях температуры калибратора, как правило, равных середине и верхнему пределу диапазона измеряемых термопреобразователями температуры, зафиксировав и внося в протокол соответствующие значения T_{02} , T_{X2} , T_{03} , T_{X3} .

Затем по таблице 3.2 определяют значения допусков ΔT_1 , ΔT_2 , ΔT_3 , соответствующих значениям температуры T_{01} , T_{02} , T_{03} , при которых проводили поверку, и устанавливают для этих значений температуры выполнение условий, аналогичных (5.7)

$$|T_{X1} - T_{01}| \leq \Delta T_1, \quad |T_{X2} - T_{02}| \leq \Delta T_2, \quad |T_{X3} - T_{03}| \leq \Delta T_3. \quad (5.8)$$

На основании полученных результатов принимают решение о соответствии погрешности поверяемых термопреобразователей требованиям ГОСТ 6651-2009 к допускаемым значениям погрешности.

5.6 Поверка вторичных термометрических приборов

Поверку вторичных приборов осуществляют имитационным методом, при котором сигналы термопреобразователей заменяют эквивалентными значениями выходных параметров эталонных калибраторов напряжений или магазинов сопротивлений.

Основным средством поверки вторичных приборов для термоэлектрических преобразователей является эталонный источник малых электрических напряжений. Это может быть специальное устройство – калибратор напряжений (приложение 6.7) или комплект, включающий в себя источник регулируемого напряжения и эталонный прибор для измерений малых постоянных напряжений – милливольтметр. При поверке вторичных приборов для термопреобразователей сопротивления используют эталонный магазин сопротивлений (приложение 6.8).

При выборе эталонных средств необходимо выполнять следующие условия:

- диапазоны входного сигнала, поступающего от эталонов, должны обеспечивать поверку в полном диапазоне измерений поверяемого прибора;
- погрешность эталона $\Delta_э$ не должна превышать $1/3\Delta_{п}$, где $\Delta_{п}$ – предел допускаемого значения погрешности поверяемого прибора.

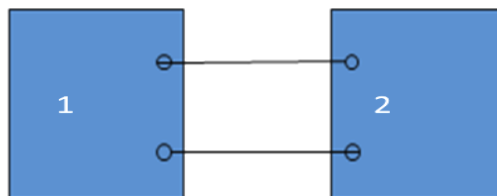


Рисунок 5.9 – Схема поверки:

1 – магазин сопротивлений или калибратор напряжения,

2 – поверяемый прибор

Поверку начинают с проведения внешнего осмотра. Устанавливают отсутствие повреждений, влияющих на работу прибора.

При первичной поверке проверяют электрическую прочность изоляции измерительных, силовых цепей и цепей дополнительных устройств относительно корпуса и цепей между собой. Для выполнения этой операции применяют установку для определения электрической прочности изоляции.

После указанных операций собирают схему поверки (рисунок 5.9), подключают поверяемый прибор к сети и выдерживают под напряжением в течение времени, указанного в руководстве по его эксплуатации.

Погрешность прибора определяют обычно не менее чем для пяти точек его диапазона измерений, в том числе, для начальной точки и конечной. Для каждой из этих точек путём регулировки эталонного источника задают значения входного параметра X_0 (сопротивления или постоянного напряжения), которые, с учётом НСХП, соответствуют значениям температуры для выбранных точек диапазона.

Записывают в протокол поверки (Приложение 4.1) показания X поверяемого прибора и значения X_0 входного параметра, задаваемые эталоном. Абсолютную погрешность прибора Δ рассчитывают по формуле

$$\Delta = X - X_0. \quad (5.7)$$

Входной параметр X_0 – это значения ТЭДС или сопротивления, определённые по номинальным статическим характеристикам (НСХП) соответствующего термопреобразователя, для отображаемого поверяемым прибором значения температуры в каждой точке диапазона. Для поверяемых приборов, отображающих значения сигналов термопреобразователей в единицах ТЭДС или сопротивления, аналогично находят отклонения показаний поверяемого прибора X от показаний X_0 эталона.

Затем рассчитывают приведённую погрешность показаний поверяемого прибора γ в процентах по формуле

$$\gamma = \frac{\Delta}{D} \cdot 100\%, \quad (5.8)$$

где Δ – наибольшее из полученных значений погрешности для каждой поверочной точки; D – нормирующее значение измеряемой величины (диапазон измерений поверяемого прибора), выраженное в единицах электрических величин или температуры (Ом, мВ, С°).

Полученное значение γ не должно превышать предела основной допускаемой приведенной погрешности $\gamma_{п}$, указанного в технической документации на поверяемый прибор.

5.7 Поверка радиационных термометров

При поверке радиационных термометров (пирометров) устанавливают соответствие их диапазона измерений и погрешности требуемым значениям. При выполнении поверки необходимо экспериментально установить это соответствие для поверяемого пирометра и принять решение о возможности его применения в сфере государственного регулирования обеспечения единства измерений.

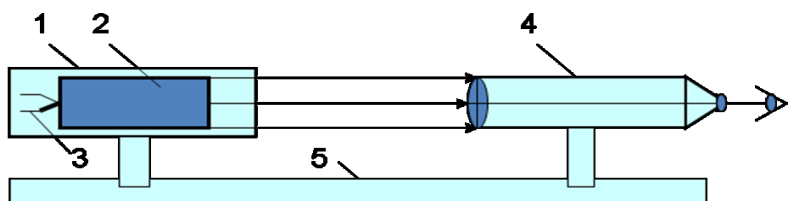


Рисунок 5.10 – Схема поверки пирометров:

1 – печь, 2 – излучатель, 3 – эталонный термопреобразователь, 4 – пирометр,
5 – станина

Определение действительных метрологических характеристик пирометров проводят методом прямых измерений температуры модели АЧТ, которая выполняет функцию эталонного источника температуры.

Расположенный в горизонтальной трубчатой печи 1 цилиндрический стакан 2 из жаропрочного металла с высокой теплопроводностью, например, из никеля, направлен открытым торцом в сторону поверяемого пирометра 4 и выполняет функцию модели АЧТ (рисунок 5.10). Эталонный термоэлектрический термопреобразователь 3 измеряет температуру донной части такого излучателя, на которую визируют пирометр. Температуру излучателя задают и поддерживают постоянной с помощью автоматического регулятора, управляющего мощностью нагревателя печи. Пирометр располагают на прочной станине 5 таким образом, чтобы его оптическая ось совпадала с осью излучателя. Погрешность пирометра определяют по отклонению его показаний от температуры модели АЧТ.

При проведении первичной или периодической проверок пирометров должны быть выполнены операции и применены средства проверки, указанные в таблице 5.1.

Таблица 5.1

Наименование операции	Средства проверки
Внешний осмотр	Визуально в соответствии с руководством по эксплуатации пирометра (РЭ)
Опробование	В соответствии с РЭ
Определение диапазона измеряемых температур	Модель АЧТ, соответствующая диапазону температур, измеряемых пирометром
Определение погрешности измерений температуры	Модель АЧТ, соответствующая диапазону температур, измеряемых пирометром

Примечание – Модель АЧТ, используемая при проверке, должна быть поверена (аттестована).

При проведении проверки должны соблюдаться следующие условия:

- температура окружающего воздуха, °С.....20±5;
- относительная влажность, %65±15;
- атмосферное давление, кПа (мм. рт. ст.) 84,0...106,7 (630...800).

Поверку начинают с проведения внешнего осмотра и проверки пирометра на функционирование согласно РЭ. Затем включают модель АЧТ в соответствии с его РЭ и устанавливают с помощью блока управления требуемую температуру. После этого включают пирометр и устанавливают на нём значение коэффициента черноты модели АЧТ, указанное РЭ. Пирометр визируют на излучающую полость модели АЧТ и измеряют его температуру.

Измерение температуры необходимо проводить на расстоянии, обеспечивающем минимальный диаметр поля зрения пирометра (указывается в РЭ). При этом диаметр выходного отверстия полости модели АЧТ должен перекрывать минимальный диаметр поля зрения пирометра.

Для расчёта погрешности в заданном диапазоне измеряемых температур для каждой точки температурного диапазона проводят 5 измерений и рассчитывают среднее значение полученных результатов. Погрешность определяют, как минимум, в трёх точках – на концах и в середине диапазона измерений пирометра.

Абсолютную погрешность пирометра рассчитывают по формуле

$$\Delta T = | T_X - T_0 | , \quad (5.9)$$

где T_X – среднее значение показаний пирометра; T_0 – значение температуры эталонного термопреобразователя АЧТ.

Полученные результаты измерений и расчёта погрешности заносят в протокол. Если хотя бы в одной проверяемой точке температурного диапазона погрешность превосходит допускаемую (указанную в РЭ пирометра), то результат поверки считается отрицательным.

Пирометры, прошедшие поверку с положительным результатом, признаются годными и допускаются к применению. На них выдается свидетельство о поверке установленной формы. При отрицательных результатах поверки выдается извещение о непригодности пирометра, свидетельство о предыдущей поверке аннулируется, а пирометр не допускается к применению в сфере государственного регулирования.

Библиография:

1. Преображенский В.П. Теплотехнические измерения и приборы – М., Энергия, 1978. – 704 с.
2. Куинн, Т. Температура – М., Мир, 1985. – 448 с.
3. Олейник Б.Н., Лаздин В.П., Жагулло О.М. Приборы и методы температурных измерений – М., Издательство стандартов, 1987. – 296 с.
4. Геращенко, О.А. Температурные измерения. Справочник / О.А. Геращенко и др.// Киев, Наукова думка, 1989. – 704 с.
5. Лепявко А.П. Цифровые средства измерений давления и температуры – М., АСМС, 2009. – 102 с.
6. ГОСТ 8.558-2009. ГСИ. Государственная поверочная схема для средств измерений температуры. – М., Стандартиформ, 2012. – 22 с.
7. ГОСТ 8.279-78 ГСИ. Термометры стеклянные жидкостные рабочие. Методы и средства поверки. – М., Изд-во стандартов, 1979. – 32 с.
8. ГОСТ 8.317-78 ГСИ. Термометры стеклянные ртутные образцовые. Методы и средства поверки. – М., Изд-во стандартов, 1979. – 33 с.
9. ГОСТ 8.461-2009 Государственная система обеспечения единства измерений (ГСИ). Термопреобразователи сопротивления из платины, меди и никеля. Методика поверки. 2011. – 24 с.
10. ГОСТ 6651- 2009. ГСИ. Термопреобразователи сопротивления из платины, меди и никеля. Общие технические требования и методы испытаний. – М., Стандартиформ, 2011. – 32 с.

11. ГОСТ 8.338 -- 2002. ГСИ. Преобразователи термоэлектрические. Методика поверки. – М., Стандартинформ, 2002. – 27 с.

12. ГОСТ Р 8.585 -- 2001. ГСИ. Термопары. Номинальные статические характеристики преобразования. – М., Стандартинформ, 2001. – 82 с.

13. ГОСТ 8.280-78. ГСИ. Потенциометры и уравновешенные мосты автоматические. Методы и средства поверки. – М., Изд-во стандартов, 1978. – 23 с.

14. МИ 1200-86. ГСИ. Преобразователи первичные пирометрические полного и частичного излучения. Методика поверки. – М., Изд-во стандартов, 1986. – 12 с.

15. ГОСТ 8.130-74. ГСИ. Пирометры визуальные с исчезающей нитью общепромышленные. Методы и средства поверки. – М., Изд-во стандартов, 1974. – 25 с.

16. ГОСТ Р 8.566-2012 Государственная система обеспечения единства измерений (ГСИ). Излучатели в виде моделей абсолютно черного тела. Методика поверки и калибровки. 2014. – 14 с.

17. ПР 50.732-93 ГСИ. Типовое положение о метрологической службе государственных органов управления и юридических лиц – М., Госстандарт России, 1994. – 13 с.

18. МИ 3290-2010 г. Москва утверждено ФГУП «ВНИИМС» 30 сентября 2016 г., согласовано Управлением метрологии Росстандарта (письмо от 26.09.2016 г. № 11427-PP/04)

19. ГОСТ 28498-90 Термометры жидкостные стеклянные. Общие технические требования. Методы испытаний – М., Стандартинформ, 2007. – 11 с.

20. ГОСТ 8.279 – 78 ГСИ. Термометры стеклянные жидкостные рабочие. Методика поверки – М., Государственный комитет СССР по стандартам, 1979. – 33 с.

21. ГОСТ 8.305 – 78. ГСИ. Термометры манометрические. Методы и средства поверки – М., Изд-во стандартов, 1979. – 7 с.

22. ГОСТ Р 8.625-2006. ГСИ. Термометры сопротивления из платины, меди и никеля. Общие технические требования и методы испытаний– М., Стандартиформ, 2007. – 27 с.

23. Федеральный закон № 102 ФЗ «Об обеспечении единства измерений» – М., Стандартиформ, (с изменениями от 02 июля 2015 года) 2008. – 17 с.

24. ГОСТ 8.010-2013 Государственная система обеспечения единства измерений (ГСИ). Методики выполнения измерений. Основные положения – М., Стандартиформ, 2014. – 27 с.

25. Бродников А.Ф, Черепанов В.Я. Поверка и калибровка средств измерений температуры. Учебное пособие – Новосибирск, АСМС, 2013. – 113 с.

Приложения А

К истории термометрии

- 1592 – Г. Галилей изобрел термоскоп, являющийся прообразом термометра.
- 1604 – К. Дреббель выполнил опыт над расширением тел от теплоты.
- 1609 – изобретен термостат.
- 1620 – опубликован трактат Ф. Бэкона “Новый органон”, в котором впервые высказана идея, что тепло есть движение.
- 1631 – Ж. Рей изобрел жидкостный термометр.
- 1641 – создан спиртовой термометр. В 1646 г. такой термометр продемонстрировал Эванджелиста Торричелли (1608-1647).
- 1655 – изобретение ртутного термометра.
- 1661 – Р. Бойль и Р. Тоунли установили зависимость между объемом газа и его давлением, которую в 1676 г. установил также Э. Мариотт (закон Бойля-Мариотта).
- 1668 – Р. Гук показал, что для всех тел точки кипения и плавления постоянны.
- 1674 – открытие Дени Папеном зависимость точки кипения воды от давления.
- 1714 – Г. Фаренгейт изготовил ртутный термометр со шкалой от 0° до 212°F (шкала Фаренгейта).
- 1730 – Р. Реомюр предложил применять в термометрах шкалу от 0° до 80° (кипение воды, шкала Реомюра).
- 1742 – А. Цельсий предложил стоградусную шкалу термометра.
- 1750 – опубликована работа М. В. Ломоносова “Размышления о природе теплоты и холода”, содержащая, в частности, идею о существовании абсолютного нуля температур.
- 1755 – Ж. Делюк установил, что для расплавления льда необходимо дополнительное количество теплоты (скрытая теплота плавления).
- 1777 – К. Шеер ввел понятие теплового излучения.
- 1787 – Ж. Шарль установил закон зависимости давления газа от температуры (закон Шарля).

- 1800 – У. Гершель открыл инфракрасные лучи.
- 1802 – исследование Ж. Гей-Люссака расширения газов при нагревании (закон Гей-Люссака).
- 1821 – Т. Зеебек открыл термоэлектричество (эффект Зеебека).
- 1824 – вышел в свет труд С. Карно, в котором содержится описание обратимого кругового термодинамического процесса и теорема о коэффициенте полезного действия тепловых двигателей (теорема Карно).
- 1826 – Ж. Гей-Люссак установил экспериментально уравнение газового состояния, объединив свой закон с законом Бойля-Мариотта.
- 1830 – Леопольдо Нобили (1784 - 1835) построил термопару.
- 1834 – Б. Клапейрон вывел уравнение состояния идеального газа, обобщенное в 1874 г. Д. И. Менделеевым (уравнение Клапейрона-Менделеева) и разработал теорию цикла Карно.
- 1835 – Мачедонио Меллони (1798 - 1854) предположил, что тепловые и световые лучи имеют одну природу и отличаются лишь длиной волны.
- 1843 – Чарльз Уитстон (1802 - 1875) изобрел способ сопротивления (мостик Уитстона).
- 1847 – Д. Герпат предложил модель идеального газа, которая объясняла газовые законы, диффузию и распространение звука в газе, его давление.
- 1848 – введение У. Томсоном понятия абсолютной температуры и абсолютной шкалы температур (шкала Кельвина).
- 1859 – открытие закона Кирхгофа для теплового излучения.
- 1862 – Г. Кирхгоф выдвинул концепцию черного тела и дал его модель.
- 1873 – И. Ван дер Вальс вывел состояние реального газа.
- 1879 – установление И. Стефаном пропорциональности энергии излучения абсолютно черного тела четвертой степени абсолютной температуры. В 1884 году эту зависимость теоретически вывел Л. Больцман. Отсюда название – закон Стефана-Больцмана.
- 1888 – доказана тепловая природа броуновского движения (Л. Гюи).
- 1892 – Дж.Дьюар изобрел вакуумный сосуд с двойными стеклами для сохранения сжиженных газов (сосуд Дьюара).

1893 - В. Вин показал, что максимум излучения в спектре абсолютно черного тела смещается в коротковолновую область при повышении температуры (закон смещения Вина).

1895 – В. Вин и О. Люммер осуществили модель абсолютно черного тела в виде полости с внутренними зеркальными стенками и узким отверстием.

1896 – В. Вин вывел формулу для распределения энергии в спектре абсолютно черного тела (закон излучения Вина) в области коротких волн.

1900 – Макс Планк предложил новую формулу для распределения энергии в спектре излучения абсолютно черного тела (закон Планка).

1900-02 гг. – экспериментальное подтверждение закона Планка (Г. Рубенс, Ф. Курлбаум).

1905 – Дж. Рэлей вывел закон распределения энергии в излучении абсолютно черного тела, развитый Дж. Джинсом (закон Рэлей-Джинса).

1906 – В. Нернст предсказал, что энтропия химически однородного твердого тела или жидкости при абсолютном нуле температуры равна нулю (теорема Нернста).

1908 – получение Г. Камерлинг-Оннесом жидкого гелия и измерение его температуры.

1909 – Г. Камерлинг-Оннес получил температуру в 1,04 К.

1926 – П. Дебай и У. Джиок независимо друг от друга предложили метод получения низких температур при помощи адиабатического размагничивания парамагнетиков (магнитное охлаждение).

Приложение Б

МИЛЛИВОЛЬТМЕТР В2-99



Прецизионный милливольтметр предназначен для измерений постоянного напряжения в диапазоне до 300 мВ и статистической обработки результатов.

Милливольтметр может использоваться в лабораториях государственных метрологических служб и метрологических служб юридических лиц для проведения точных измерений напряжения. Метрологические характеристики милливольтметра обеспечивают возможность проведения поверки и градуировки эталонных термоэлектрических преобразователей 2-го и 3-го разрядов, всех типов рабочих термоэлектрических преобразователей и термометров

сопротивления в составе поверочных установок (например, в установке УПСТ-2М).

Технические и метрологические характеристики:

1.1. Прибор обеспечивает проведение измерений напряжения в диапазоне

от минус 300 до плюс 300 мВ с запасом 0,03 мВ на концах диапазона.

1.2. Предел допускаемой основной погрешности определяется по формулам:

$$- \text{ для времени измерений } 1,0 \dots 2,5 \text{ с} - \pm(1,5 \cdot 10^{-3} + 4,5 \cdot 10^{-5} \cdot U) \text{ мВ}, \quad (1)$$

$$- \text{ для времени измерений } 3,0 \dots 8,5 \text{ с} - \pm(6 \cdot 10^{-4} + 4,5 \cdot 10^{-5} \cdot U) \text{ мВ}, \quad (2)$$

где U – значение модуля измеренного напряжения, мВ.

1.3. Время измерений от 1,0 до 8,5 с – устанавливается оператором с дискретностью 0,5 с.

1.4. Входное сопротивление прибора не менее 500 Мом.

1.5. Прибор обеспечивает по команде оператора фиксацию смещения нуля от минус 15 мВ до 15 мВ с последующим автоматическим смещением нуля на зафиксированное значение.

1.6. Прибор обеспечивает по команде оператора автоматическое обновление коэффициентов коррекции по внутренним опорным сигналам (АВК) с одновременным обнулением зафиксированного значения смещения нуля.

1.7. Прибор обеспечивает обновление коэффициентов по внешнему опорному напряжению по команде оператора.

1.8. Прибор обеспечивает вывод измеренных значений в ЭВМ по стандартному интерфейсу RS-232.

1.9. Прибор обеспечивает выбор оператором в диапазоне от 2 до 99 максимального количества N результатов измерений, по которым определяется математическое ожидание (МО) и среднее квадратическое отклонение (СКО).

1.10. Прибор обеспечивает определение МО и СКО по выборке из N_t последних результатов измерений, при этом N_t может принимать значения от 0 до N в зависимости от количества полученных результатов измерений.

1.11. Прибор выводит на индикатор следующие значения:

- значение измеренного напряжения в мВ с дискретностью 0,0001мВ и указанием полярности;

- значение установленного времени измерений в секундах с дискретностью 0,1 сек;

- вычисленное значение МО в мВ с дискретностью 0,00001 мВ и указанием полярности;

- вычисленное значение СКО в мкВ с дискретностью 0,001мкВ;

- значение N ;

- значение N_t .

Значение измеренного напряжения или значение МО должно дублироваться в основном поле индикации. При этом значение, которое дублируется, используется светлыми символами на тёмном фоне.

Помимо указанных значений прибор выводит на индикатор следующие специальные признаки:

- индикатор хода измерений, который предназначен для сигнализации обновления данных на индикаторе прибора;

- признак выхода на режим, который показывает состояние внутреннего термостата прибора;

- признак корректировки смещения нуля, который сигнализирует о наличии или отсутствии смещения нуля при проведении измерений.

1.12. Прибор обеспечивает возможность выбора оператором одного из значений: значения измеренного напряжения или значения МО для дублирования в основном поле индикации.

1.13. Прибор обнуляет накопленное значение МО, СКО, N_t и начинает новое определение МО и СКО в следующих случаях:

- а) по нажатию оператором кнопки «ESC»;

- б) после изменения оператором значения N ;
- в) после изменения оператором времени измерений;
- г) после применения автоматической калибровки;
- д) после проведения автоматического обновления коэффициентов коррекции по внутренним опорным сигналам (АВК);
- е) после проведения смещения нуля.

1.14. Прибор сохраняет после выключения питания текущее значение времени измерения, информацию о том, какое из значений выводить в основное поле индикации.

1.15. Прибор в течение одной минуты выдерживает наличие на измерительном входе постоянного напряжения значением 3 В.

Приложение В

ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ СИГНАЛОВ ТС И ТП ПРЕЦИЗИОННЫЙ «ТЕРКОН»



Прецизионный преобразователь сигналов «Теркон» предназначен для одновременного и независимого преобразования выходных сигналов термопреобразователей сопротивления (ТС) и/или термоэлектрических преобразователей (ТП) в значения температуры.

Достоинства преобразователя:

- высокоточное преобразование температуры и измерение напряжения и сопротивления;

- возможность автоматической или ручной компенсации ТЭДС свободных концов;

- возможность ввода индивидуальных характеристик преобразования эталонных датчиков температуры;

– возможность увеличения числа поверяемых ТС и ТП до 15-ти при помощи внешнего коммутатора;

– наличие порта RS232 и сервисного программного обеспечения.

1. Технические и метрологические характеристики:

1.1. Верхний предел измерений сопротивления, Ом.....1000

1.2. Верхний предел измерений напряжения, мВ.....±1000

1.3. Пределы допускаемой основной погрешности:

– измерений сопротивления, Ом.....±[0,0002+1·10⁻⁵·R_{изм}]

– измерений напряжения, мВ.....±[0,0005+5·10⁻⁵·U_{изм}]

1.4. Пределы допускаемой основной погрешности измерений температуры термометрами сопротивления (без учета погрешности ТС) представлены в таблице 1

Таблица 1

Тип термометра сопротивления	Диапазон температуры, °С	Погрешность измерений, °С, не более
Pt10	-200...+600	±0,016
Pt50	-200...+600	±0,011
Pt100	-200...+600	±0,011
Cu10	-10...+200	±0,009
Cu50	-10...+200	±0,006
Cu100	-10...+200	±0,005

1.5. Пределы допускаемой основной погрешности измерений температуры термопарами (без учёта погрешности ТП и погрешности измерений температуры свободных концов) представлены в таблице 2

Таблица 2

Тип термопары	Диапазон температуры, °С	Погрешность измерений, °С, не более
В	+350....+1820	±0,2
Е	–200....+1000	±0,2
J	–200....+900	±0,1
К	–200....+1372	±0,2
L	–200....+800	±0,2
N	–200....+1300	±0,2
R	0....+1768	±0,2
S	0....+1768	±0,2
T	–200....+400	±0,2

1.6. Индикация измеряемых величин – с помощью цифрового табло

1.7. Количество разрядов индикации:

– для измеряемых величин 7

– текущего режима 2

1.8. Цена единицы младшего разряда:

– при измерении напряжения, мВ 0,0001

– при измерении сопротивления, Ом 0,0001

при измерении температуры:

– с помощью термометров сопротивления, °С 0,001

– с помощью термопар, °С 0,01

1.9. Количество независимых каналов измерения, шт 2

– с внешним коммутатором, шт 16

- 1.10. Ток, пропускаемый через термометр сопротивления, мА,
не более 0,5
- 1.11. Время измерения 2-х каналов, с, не более 0,8
- 1.12. Время выхода на режим после включения, мин, не более 30
- 1.13. Средняя наработка на отказ, ч, не более 5000

Приложение Г

ТЕРМОСТАТ «ТЕРМОТЕСТ-150»



1.1. Назначение

1.1.1 Термостат предназначен для поддержания заданной температуры при поверке и калибровке термопреобразователей сопротивления (далее по тексту – термосопротивлений) в соответствии с ГОСТ 8.461-2009.

1.1.2 Термостат может быть использован в поверочных, калибровочных и научно-исследовательских лабораториях.

1.1.3 При эксплуатации в рабочих условиях термостат устойчив к воздействию климатических факторов для исполнения УХЛ 4.2 ГОСТ 15150 со следующими уточнениями:

- температура окружающего воздуха, °С от 10 до 35.
- относительная влажность воздуха при температуре 25 °С, % до 80.

Термостат «Термотест-150» предназначен для поддержания заданной температуры при поверке и калибровке термопреобразователей в диапазоне температуры от 20 до 150°С. Глубина погружения поверяемых термопреобразователей составляет не менее 250 мм. В качестве теплоносителя используется силиконовое масло ПМС-20.

Основные особенности:

- крышка (держатель) для установки 12 термопреобразователей;
- уровень теплоносителя в рабочей ванне позволяет снимать показания стеклянных термометров, погруженных до поверяемой отметки;
- развитые системы самодиагностики и защиты для контроля превышения температуры теплоносителя над установленным значением, уровня теплоносителя в ванне, температуры двигателя насоса, исправности нагревателей и элементов управления ими;
- включение и выключение в заданное время благодаря встроенным часам;
- адаптивный самонастраивающийся регулятор температуры;
- возможность регулировать температуру по программе, состоящей из 10-ти температурно-временных интервалов;
- выбор оптимальных настроек в зависимости от используемого теплоносителя;
- регулируемая скорость нагрева и охлаждения теплоносителя;
- возможность подключения внешнего датчика температуры;
- насосы, выполненные из нержавеющей стали, подшипники и пружинные муфты оригинальной конструкции, используемые в приводе,

гарантируют длительную работу термостатов с любым теплоносителем в широком диапазоне температуры.

1.2 Технические и метрологические характеристики

1.2.1 Диапазон регулирования температуры, °С от 20 до 150.

1.2.2 Время выхода термостата до установленной температуры ч, не более 1,5.

1.2.3 Нестабильность поддержания установленной температуры в течение 1 ч, °С в пределах ±0,02.

1.2.4 Неоднородность температурного поля в рабочем объеме термостата, °С, в пределах ±0,02.

1.2.5 Объем теплоносителя при температуре 20 °С, л, не более 19,0.

1.2.6 Рекомендуемый теплоноситель

– для диапазона температуры от 20 до 100 °С – жидкость охлаждающая ОЖ40 (ТОСОЛ А-40) ГОСТ 28084;

– для диапазона температур от 20 до 150 °С – ПМС-20 ГОСТ 13032.

1.2.7 Габаритные размеры термостата, мм, не более 425×360×570.

1.2.8 Размеры рабочей зоны, мм 230×280×190.

1.2.9 Масса термостата без теплоносителя, кг, не более 32.

1.2.10 Время непрерывной работы в лабораторных условиях, ч, не более 8.

1.2.11 Средний срок службы, лет, не менее 7.

1.2.12 Средняя наработка на отказ ч, не менее 4000.

1.2.14 Питание термостата осуществляется от сети переменного тока напряжением (220±22) В частотой (50±1) Гц.

1.2.15 Потребляемая мощность, кВт, не более 2,5.

1.2.16 По требованиям безопасности термостаты удовлетворяют требованиям ГОСТ 12.2.007.0.

1.2.17 По способу защиты от поражения электрическим током термостаты относятся к классу I.

Приложение Д

КАЛИБРАТОР ТЕМПЕРАТУРЫ ЭТАЛОННЫЙ КТ-500



1.1 Назначение

1.1.1 Калибраторы температуры эталонные 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

1.1.2 КТ-500 используют в качестве рабочих эталонов (поверочных установок) при поверке и калибровке термопреобразователей сопротивления (ТС) по ГОСТ 6651-2009 и DIN № 43760, преобразователей термоэлектрических (ТП) по ГОСТ Р. 8.585-2001, ТС ТП с индивидуальными статическими характеристиками преобразования, термопреобразователей с унифицированным выходным сигналом.

1.1.3 Калибраторы температуры эталонные КТ-500 имеют две модификации – КТ-500/М, КТ-500/М2, отличающиеся функциональными возможностями: КТ-500/М1 – повышенной точности, в КТ-500/М2 предусмотрено центральное отверстие для размещения в нём ампул с металлами для реализации реперных точек затвердевания индия, олова и цинка или вставки с набором отверстий под поверяемые термопреобразователи и эталонный (образцовый) термометр с целью повышения точности результата измерений, выполняемых при передачи единицы температуры.

1.1.4 Степень защиты от проникновения твёрдых тел и воды КТ-500 соответствует IP30 согласно ГОСТ 14254-96

1.1.5 По устойчивости к воздействию климатическим воздействиям при эксплуатации КТ-500 соответствует группе исполнения В согласно ГОСТ 12997-84.

1.2 Технические и метрологические характеристики

1.2.1 Диапазон воспроизводимых температур, °С от 50 до 500.

1.2.2 Пределы допускаемой основной погрешности воспроизведения температуры, °С, для:

– КТ-500/М1 с индексом заказа:

А и В $\pm(0,04+0,03 \times \frac{t}{100})$.

– КТ-500/М2 $\pm(0,05+0,1 \times \frac{t}{100})$.

где t – значение воспроизводимой температуры.

1.2.3 Пределы допускаемой основной абсолютной погрешности передачи единицы температуры, °С, при использовании внешнего эталонного термометра для КТ-500/М2 в центральной вставке $\pm(0,02+0,008x\frac{t}{100})$.

1.2.4 Пределы допускаемой основной абсолютной погрешности воспроизведения температуры в ампулах реперных точек, °С:

индия $\pm 0,002$;

олова $\pm 0,003$;

цинка $\pm 0,001$;

1.2.5 Нестабильность поддержания температуры за 30 мин, °С $\pm(0,02x\frac{t}{100})$.

1.2.6 Неоднородность температурного поля по высоте рабочей зоны от 0 до 40 мм, °С:

– КТ-500/М1 с индексом заказа:

А и В $\pm(0,01+0,02x\frac{t}{100})$.

– КТ-500/М2 $\pm(0,02+0,06x\frac{t}{100})$.

1.2.6 Разность воспроизводимых температур в каналах с одинаковыми диаметрами, °С:

– КТ-500/М1 с индексом заказа:

А $\pm(0,01+0,03x\frac{t}{100})$.

В $\pm(0,02+0,05x\frac{t}{100})$.

– КТ-500/М2 $\pm(0,02+0,08x\frac{t}{100})$.

1.2.7 Дополнительная погрешность, вызванная неполным погружением поверяемого термопреобразователя в канал, не превышает (кроме КТ-500/М1):

– 0,5 основной погрешности для глубины погружения 160 мм,

– 1,2 основной погрешности для глубины погружения 120 мм.

Для КТ-500/М1 с индексом дополнительная погрешность, вызванная неполным погружением поверяемого термопреобразователя в канал, не превышает:

– 0,5 основной погрешности по индексу заказа А для глубины погружения 160 мм,

– 1,2 основной погрешности по индексу заказа В для глубины погружения 120 мм.

1.2.8 Единица последнего разряда индикатора, °С 0,01.

1.2.9 Максимальная скорость нагрева, °С/мин 16.

1.2.10 Максимальная скорость охлаждения, °С/мин при
100 °С 1;

400 °С 5.

1.2.11 Максимальное время установления рабочего режима, мин 80.

1.2.12 Питание КТ-500 осуществляется от сети переменного тока с частотой (50±1) Гц и напряжением (220±22) В при стабильности ±4,4 В.

1.2.13 Мощность, потребляемая КТ-500 от сети переменного тока при номинальном напряжении сети, кВт:

в режиме нагрева 2,5;

в рабочем режиме 1,0.

1.2.14 Изоляция электрической цепи питания относительно корпуса выдерживает в течении 1 мин действие испытательного напряжения синусоидальной формы 660 В и частотой от 45 до 65 Гц и относительной влажности от 30 до 80%.

1.2.15 КТ-500 устойчив к температуре окружающего воздуха от плюс 10 до плюс 35 °С.

1.2.16 КТ-500 устойчив к воздействию влажности до 75 % при 30 °С.

1.2.17 Габаритные размеры КТ-500 не более, мм:

длина – 320, ширина – 180, высота – 370.

1.2.18 Масса КТ-500 не более 15 кг.

Приложение Е

ИЗЛУЧАТЕЛЬ АЧТ – 45/100/1100



Излучатель в виде модели абсолютно черного тела АЧТ-45/100/1100 (далее – излучатель АЧТ) второго разряда предназначен для поверки, калибровки и градуировки средств бесконтактных измерений температуры (радиационных термометров и тепловизоров) в диапазоне температуры от 300 до 1100 °С в лабораторных и цеховых условиях.

Излучатель АЧТ-45/100/1100 рассчитан на эксплуатацию при температуре окружающего воздуха (20 ± 5) °С, относительной влажности (65 ± 15) % при температуре 25 °С и давлении от 84 до 106,7 кПа (от 630 до 795 мм рт. ст.).

Электропитание излучателя осуществляется от однофазной сети переменного тока напряжением (220 ± 22) В, частотой (50 ± 1) Гц.

2 Технические и метрологические характеристики

- 2.1 Диапазон воспроизводимых температур, °С..... от 300 до 1100
- 2.2 Диаметр выходного отверстия полости излучателя, мм..... 45
- 2.3 Расстояние от переднего торца печи до полости излучателя,
мм..... 425 ± 5
- 2.4 Коэффициент черноты излучателя, не менее 0,99
- 2.5 Время выхода на стационарный режим, мин, не более 120
- 2.6 Дрейф температуры излучателя за 15 минут в стационарном режиме
поддержания температуры, °С, не более 0,25
- 2.7 Время перехода на другой стационарный режим, мин, не более 120
- 2.8 Погрешность поддержания температуры излучателя в стационарном
режиме, °С, не более..... 0,5
- 2.9 Доверительная погрешность установленного значения T
температуры при вероятности 0,95, не более $(1 + 0,006T)$ °С

Приложение Ж

ИМИТАТОР СИГНАЛОВ КОМБИНИРОВАННЫХ ИСК-1



Имитаторы сигналов, комбинированные ИСК-1 предназначены: для измерений и воспроизведения значений постоянного напряжения и тока, для измерений сопротивления постоянному току, для использования в качестве вторичных приборов при измерениях температуры термоэлектрическими преобразователями (ТП) по ГОСТ Р 8.585-2001 и для воспроизведения сигналов этих датчиков, а также для измерений температуры при помощи термопреобразователей сопротивления (ТС) по ГОСТ Р 8.625-2006.

Предназначены для проверки, настройки и подготовки к поверке показывающих и регистрирующих приборов, измерительных преобразователей, нормирующих преобразователей, автоматических регуляторов, различных измерительных и управляющих комплексов.

Имитаторы сигналов, комбинированные ИСК-1, могут использоваться в качестве источников сигналов и контрольно-измерительных приборов. Они позволяют облегчить ремонт и наладку измерительных систем службами КИП и А непосредственно в условиях эксплуатации без демонтажа

оборудования в энергетике, металлургии, химической, нефтехимической и других отраслях промышленности и хозяйственного комплекса. Индикатор приборов отображает значение измеряемой или воспроизводимой величины, а также тип датчика или диапазон измерений, режимы работы и другую дополнительную информацию. Имеется возможность сохранения в памяти приборов 10 наиболее часто воспроизводимых значений для каждого типа датчика или измеряемой величины. В дальнейшем возможно использование этих значений при воспроизведении величины вместо повторного их набора на клавиатуре.

1. Технические и метрологические характеристики

1.1 Диапазоны воспроизводимых или измеряемых температур, разрешающая способность и пределы допускаемой основной абсолютной погрешности от установленного типа ТП и ТС приведены в таблице 1.

Таблица 1

Контролируемая величина	НСХ	Диапазон температуры, °С	Разрешающая способность, °С	Пределы допускаемой погрешности, °С
Сигналы термопар (воспроизведение и измерение)	ХА (К)	-100...+1300	0,1 °С	±1 *
	ХК (L)	-100...+760		±1 *
	ЖК (J)	-200...+1100		±1 *
	ПР (В)	300...+1800		±5 *
	ПП (S)	300...+1300		±2 *
	ВР (А-1)	300...+1800		±3 *
Сигналы преобразователей сопротивления (измерение)	50П	-100...+850	0,1 °С	±0,5
	Pt50	-100...+850		±0,5
	100П	-100...+850		±0,5
	Pt100	-100...+850		±0,5

	50M	-100...+200		±0,5
	100M	-100...+200		±0,5

Примечание – *Погрешность указана с учетом погрешности внутреннего компенсатора температуры свободных концов. При вводе предельных значений диапазона температуры возможна погрешность, равная разрешающей способности.

1.2. Подключение ТС к прибору осуществляется по четырехпроводной схеме с сопротивлением каждого провода не более 50 Ом.

1.3. Диапазоны воспроизводимых значений напряжения, тока и сопротивления, а также разрешающая способность и пределы допускаемой основной абсолютной погрешности приведены в таблице 2.

Таблица 2

Контролируемая величина	Пределы измерений (воспроизведения)	Разрешающая способность	Пределы допускаемой погрешности
Напряжение (воспроизведение и измерение)	0...150 мВ	0,001 мВ	$\pm(1,5 \cdot 10^{-2} + 10^4 \cdot U)$, мВ
	0...10В	0,001В	$\pm(5 \cdot 10^{-3} + 5 \cdot 10^{-4} \cdot U)$, В
Ток (воспроизведение и измерение)	0...20мА	0,001мА	$\pm(5 \cdot 10^3 + 2,5 \cdot 10^4 \cdot I)$, мА
Сопротивление (измерение)	0...300 Ом	0,01 Ом	±0,1Ом

1.4. Пределы допускаемой дополнительной погрешности, вызванной изменением температуры окружающего воздуха от нормальной, не более

половины предела допускаемой основной погрешности на каждые 10°C изменения температуры окружающего воздуха.

1.5. Прибор обеспечивает автоматический выбор предела при измерении напряжения в диапазонах от 0 до +150 мВ и от 0 до +10 В.

1.5. Прибор обеспечивает двухстороннюю связь с ЭВМ по интерфейсу RS232.

Приложение И

МАГАЗИН СОПРОТИВЛЕНИЙ Р4831



Измерительный магазин сопротивлений Р4831 служит для измерений сопротивления постоянному и переменному току и используется в качестве многозначной меры электрического сопротивления. Измерительный магазин Р4831 выполнен в настольном горизонтальном исполнении и имеет карболитовый корпус. На панель управления прибора выведены декадные переключатели и клеммные соединители. Каждая из декад имеет по десять равных по номиналу значений устанавливаемых сопротивлений. На панель также выведены и множители декад. Работа с магазином заключается в последовательном подключении требуемого количества резисторов с эталонным значением сопротивлений, выставляемых в каждой декаде.

Магазин сопротивлений предназначен для работы в цепях постоянного тока в качестве многозначной меры электрического сопротивления. Магазин широко применяется в метрологии, лабораторных исследованиях при осуществлении измерений электрических величин при поверке средств измерений и при их наладке.

Технические и метрологические характеристики

Класс точности магазина Р4831 при использовании в качестве многозначной меры – $0,02/2 \times 0,000001$ ($0,02/2 \cdot 10^{-6}$). Диапазон его показаний при использовании в качестве многозначной меры – от начального значения до 111111,1 Ом ступенями через 0,01 Ом.

Нормальные условия применения магазина:

- температура окружающего воздуха (20 ± 2) °С;
- относительная влажность воздуха от 25 до 80%;
- атмосферное давление от 630 до 800 мм. рт. ст.

Предел допускаемого отклонения действительного значения сопротивления δ в процентах от номинального значения определяется по формуле:

$$\delta = \pm \left\{ 0,02 + 2 \cdot 10^{-6} \left(\frac{R_K}{R} - 1 \right) \right\}$$

где R_K — наибольшее значение сопротивления магазина, Ом; R — номинальное значение установленного сопротивления, Ом.

Номинальная мощность рассеивания на одну ступень составляет: 0,001 W для декады 0,01 Ом; 0,01 W для декады 0,1 Ом; 0,05 W для декады 1 Ом и выше.

Среднее значение начального сопротивления магазина (сопротивление при установке всех декадных переключателей на нулевые показания) не превышает 0,021 Ом. Вариация начального сопротивления магазина, вызванная изменением переходных сопротивлений контактов переключающих устройств, не превышает 0,0021 Ом.

ДЛЯ ЗАМЕТОК

Бродников Александр Федорович,
Вихарева Надежда Анатольевна

**ПОВЕРКА И КАЛИБРОВКА
СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ ТЕМПЕРАТУРЫ**

Учебное пособие

Подписано в печать 03.03.2021. Формат 60×84/16. Бумага офсетная.
Тираж 100 экз. Уч.-изд. л. 5,6. Усл. печ. л. 7,78. Печать цифровая.
Заказ № 0303/2021

Отпечатано в типографии ООО Издательство «Сибпринт»
630099, г. Новосибирск, ул. М. Горького, д. 39
тел. +7 (383) 218-00-36, e-mail: izdat-nsk@list.ru
www.ifb.ru