

ГЛАВА 2. ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ

2.1 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

2.1.1 Определение

Термодинамическая температура, T , — это физическая величина, характеризующая среднюю энергию хаотического движения молекул вещества. Прямое измерение T с помощью так называемых первичных термометров является экспериментально сложным и даже в национальных институтах измерений проводится лишь периодически. Вместо этого Консультативный комитет по термометрии (ККТ) МБМВ рекомендует использовать МТШ-90 для получения практических приближений к термодинамической температуре (BIPM 1989, 1990)¹. МТШ-90 обобщает наши знания о первичной термометрии в 1990 году и рекомендует значения точек замерзания, плавления или тройных точек чистых веществ, которые могут быть использованы для калибровки стандартных ПТС (СПТС). В температурном диапазоне, представляющем метеорологический интерес (от $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $60\text{ }^{\circ}\text{C}$), МТШ-90 определяет, каким образом изменяется электрическое сопротивление СПТС между этими фиксированными точками температуры. Было показано, что приближенные значения термодинамической температуры, полученные с помощью МТШ-90, имеют погрешность менее $\pm 0,01\text{ }^{\circ}\text{C}$ во всем диапазоне, представляющем интерес с точки зрения метеорологии (Underwood et al., 2017).

Для метеорологических целей измеряют температуру ряда компонентов окружающей среды. Наиболее распространенной измеряемой переменной величиной является температура воздуха (на различных высотах). Также измеряется температура поверхности грунта, подповерхностная температура почвы, минимальная температура воздуха над травяным покровом и температура пресной и морской воды. В публикации WMO (1992) температура воздуха определяется как «температура, измеренная с помощью термометра, установленного на открытом воздухе в месте, защищенном от прямой солнечной радиации». Несмотря на то, что данное определение нельзя использовать для определения термодинамической величины как таковой, оно пригодно для большинства применений.

2.1.2 Единицы измерения и шкалы

Единицей измерения термодинамической температуры T является кельвин (К). Один кельвин определяется как $1/273,16$ часть термодинамической температуры тройной точки воды. Таким образом, согласно определению, тройная точка воды возникает при $0,01\text{ }^{\circ}\text{C}$ и парциальном давлении водяного пара точно $611,657\text{ Па}$; для большинства метеорологических целей используется температура (t) в градусах по Цельсию, определяемая с помощью уравнения 2.1:

$$t/^{\circ}\text{C} = T/\text{K} - 273,15 \quad (2.1)$$

Часто для калибровки используется равновесие между тающим льдом и насыщенной воздухом водой («точка льда»). При стандартном атмосферном давлении ($101,325\text{ кПа}$) точка льда возникает при температуре $273,150\text{ К}$ ($0,000\text{ }^{\circ}\text{C}$) и изменяется на $-9,91 \times 10^{-5}\text{ К кПа}^{-1}$. Таким образом, изменение составляет менее $\pm 0,001\text{ }^{\circ}\text{C}$ при изменении атмосферного давления с 111 кПа до 92 кПа (Harvey et al., 2013).

Один $^{\circ}\text{C}$ равен одному К. Необходимо отметить, что обозначение К используется без символа, употребляемого для обозначения градусов ($^{\circ}$).

¹ Авторитетным органом по вопросам, связанным с этой шкалой, является МБМВ; см. <http://www.bipm.org>. ККТ является исполнительным органом, отвечающим за разработку и осуществление МТШ.

Результаты измерений температуры по термодинамической шкале выражаются по отношению к абсолютному нулю (0 K) — температуре, при которой тепловая энергия молекул любого вещества равна нулю. МТШ-90 дает практическое приближение термодинамической температуры (см. приложение), которая основана на значениях температуры ряда воспроизводимых состояний равновесия (см. таблицу в приложении) и на определенных эталонных приборах, градуированных по этим значениям температуры (Nicholas and White, 1993; Quinn, 1990). Большинство термометров для метеорологических видов применения градуируются путем сопоставления либо с термометром, проградуированным в соответствии с МТШ-90, либо со вторичным стандартом, который, в свою очередь, был откалиброван в соответствии с МТШ-90 (BIPM/CCT, 1990; Nicholas and White, 1993; Bentley, 1998).

2.1.3 Метеорологические требования

2.1.3.1 Общие сведения

Для метеорологии требуются в основном следующие измерения температуры:

- a) воздуха вблизи поверхности земли;
- b) подстилающей поверхности;
- c) почвы на различных глубинах;
- d) поверхности морей и озер (см. главу 4 тома III настоящего Руководства);
- e) верхних слоев атмосферы (см. главу 12 настоящего тома).

Результаты этих измерений, совместных или независимых, локальных или в глобальном масштабе, используются в численных моделях прогноза погоды (ЧПП), для синоптического анализа, для решения гидрологических и сельскохозяйственных задач, а также в качестве показателей изменчивости климата. Локальная температура также оказывает прямое физиологическое влияние на ежедневную деятельность людей на всем земном шаре. Могут потребоваться как непрерывные измерения температуры (регистрация), так и через различные временные интервалы. В этой главе рассматриваются измерения температуры, указанные в пунктах (a), (b) и (c).

2.1.3.2 Погрешность измерений

В главе 1 этого тома подробно описаны требования к диапазону, разрешающей способности и погрешности измерений температуры. Метеорологические термометры должны градуироваться в соответствии с лабораторным эталоном, и по мере необходимости в их показания могут вноситься поправки. Необходимо ограничить величину поправок, чтобы остаточная погрешность измерений не превышала установленные пределы. Кроме того, следует выбирать такой рабочий диапазон термометра, который соответствует местному климатическому диапазону изменения температуры.

Все термометры должны быть снабжены либо свидетельством с данными о погрешности измерения или техническими характеристиками, либо свидетельством о проверке, содержащим поправки, которые следует применять для достижения необходимой точности. Первичные, а также плановые испытания и калибровка должны проводиться в лаборатории, аккредитованной по стандарту ИСО/МЭК 17025.

2.1.3.3 **Инерционность**

Для обычных метеорологических наблюдений неудобно использовать термометры, постоянные времени или коэффициенты инерции которых чрезвычайно малы, так как температура воздуха непрерывно меняется, иногда на один-два градуса за несколько секунд. Поэтому для получения репрезентативных значений температуры с помощью такого термометра необходимо взять среднее ряда его показаний. Термометр с большей постоянной времени сглаживает быстрые флуктуации, однако слишком большая постоянная времени может привести к погрешностям при медленных изменениях температуры. Рекомендуется, чтобы постоянная времени — время, необходимое для того, чтобы термометр регистрировал 63,2 % пошагового изменения температуры воздуха, — составляла порядка 20 секунд. При этом постоянная времени термометра уменьшится при быстром воздушном потоке над датчиком.

2.1.3.4 **Регистрация условий, в которых производятся измерения**

Температура является одной из метеорологических величин, точность измерения которой в значительной степени зависит от экспозиции. В частности, при изучении климата необходимо учитывать, что результаты измерения температуры определяются состоянием окружающей среды, наличием растительности, источниками тепла, такими как строения и другие объекты, состоянием подстилающей поверхности, состоянием и изменением радиационной защиты или экрана, а также другими изменениями в оборудовании (WMO, 2011). Важно осуществлять регистрацию не только температурных данных, но и условий, в которых производятся измерения. Такая информация называется метаданными (данными о данных; см. этот том, глава 1, приложение 1.F).

2.1.4 **Методы измерений и наблюдений**

Излучение солнца, облаков, земли и других окружающих объектов проходит сквозь воздух без какого-либо заметного изменения его температуры, но термометр, установленный на открытом пространстве, может поглощать значительное количество радиации. Вследствие этого собственная температура термометра может отличаться от истинной температуры воздуха. Различие зависит от соотношения между поглощением и излучением радиации и термического контакта с воздухом. Влияние излучения можно минимизировать, используя блестящие термометры, которые отражают, а не поглощают радиацию, и имеют небольшой диаметр, благодаря чему они эффективно охлаждаются воздухом (Çengal and Ghajar, 2014; Incropera and de Witt, 2011; Erell et al., 2005; Harrison, 2015). Для очень тонкой проволоки, используемой в термометре сопротивления без защиты, разность с истинной температурой воздуха может быть очень небольшой или даже пренебрежимо малой. Было установлено (Harrison and Pedder, 2001; Harrison and Rogers, 2006; Harrison, 2010), что нагревание термометра, изготовленного из платиновой проволоки длиной 500 мм и диаметром 0,025 мм, закрепленной на каркасе и открытой непосредственному воздействию солнца, вследствие излучения составляет менее 0,07 °C/100 Вт м⁻² при скорости ветра более 1 м·с⁻¹. Погрешность такого термометра, как правило, будет менее 1 °C при полном солнечном свете. Подобное воздействие было продемонстрировано и для очень тонких термопар (Bugbee et al., 1995).

Однако у обычных рабочих термометров при очень неблагоприятных условиях разность может достигать 25 K. Таким образом, для того чтобы показания термометра как можно точнее отражали истинную температуру воздуха, необходимо защитить его от воздействия радиации; это достигается путем установки термометров в естественно вентилируемой будке либо — в радиационной защите, которая также обычно служит средством крепления термометра (см. 2.5).

Защита также предохраняет термометр от осадков, обеспечивает свободную циркуляцию воздуха вокруг него и предотвращает случайные повреждения термометра. Если на датчик попадают осадки, то датчик будет охлаждаться в результате испарения, а степень охлаждения будет определяться местным воздушным потоком. Это охлаждение

аналогично поведению смоченного термометра в психрометре (см. настоящий том, глава 4). Однако обеспечение свободной циркуляции может быть затруднительным в условиях обледенения. Методы сокращения погрешностей наблюдений в таких условиях могут быть различными и включать использование экранов или приборов для измерения температуры специальной конструкции, включая использование искусственной вентиляции.

Однако при использовании искусственной вентиляции следует соблюдать осторожность, так как на термометр может попасть влага. Во время осадков, мороси и тумана осаждение влаги в сочетании с испарением может приводить к аномальным показаниям. В публикации Sparks (1970) приводится обзор методов измерения температуры, пригодных для оперативного применения. Примером передовой практики размещения термометров являются «трижды дублированные» вентилируемые датчики (Diamond et al., 2013).

2.1.4.1 **Общие принципы измерений**

Измерения температуры предмета или вещества можно разделить на контактные и бесконтактные.

При контактной термометрии термометр помещается в физический контакт с предметом, и в идеале (при термодинамическом равновесии) он достигает той же температуры, что и предмет, и, таким образом, температуру предмета можно определить по температуре самого термометра. В качестве принципа действия термометра можно использовать любое свойство вещества, зависящее от температуры. Наиболее широко используемыми в метеорологических термометрах свойствами являются изменение электрического сопротивления металлов с температурой и тепловое расширение жидкостей и твердых тел.

В качестве приборов для измерения температуры рекомендуется пользоваться электрическими термометрами. Они уже приобрели большую популярность в метеорологии для измерения температуры и имеют потенциал для автоматических и непрерывных измерений. Чаще всего принципом измерения служит зависимость температуры от электрического сопротивления металла. Термопары редко используются в системах метеорологического наблюдения. В основу их работы положен принцип «эффекта Сибека», который создает напряжение, зависящее от температуры.

Принцип теплового расширения металлов используется в механических термографах с биметаллическими датчиками или датчиками с трубкой Бурдона. Эти приборы используются тогда, когда не так важна точность, но необходимо отслеживать тенденции. Они считаются устаревшими и должны быть заменены на альтернативные варианты, если это возможно.

Большая разность между тепловым расширением жидкостей и стекла используется в жидкостных стеклянных термометрах. На протяжении многих веков для измерения температуры в таких устройствах использовались ртуть или спирт. Стеклянные ртутные термометры, используемые в диапазоне от -30 °C до 50 °C, были широко распространены ранее, но больше не рекомендуются. Учитывая Минаматскую конвенцию о ртути (см. 2.1.4.5), НМГС рекомендуется принять надлежащие меры для скорейшей замены стеклянных ртутных термометров на современные альтернативы.

В бесконтактной термометрии для оценки температуры используется тепловое излучение, испускаемое поверхностью предмета. Обычно это излучение наиболее интенсивно в ИК или микроволновой области электромагнитного спектра. Кроме того, температуру воздуха в области пространства можно измерять без физического контакта путем определения характеристик передачи звуковых, ультразвуковых или электромагнитных волн через воздух (WMO, 2002a). Бесконтактные термометры не часто применяются для метеорологических измерений, но могут давать преимущества при некоторых специализированных видах применения.

Значительный объем исследований направлен на разработку бесконтактных методов измерения температуры воздуха. Ультразвуковые анемометры дают параметр под названием «акустическая температура», который может отслеживать колебания температуры воздуха со скоростью до 100 показаний в секунду. Такие быстрые измерения полезны для оценки теплового потока (Schotanus et al., 1983), но их общая точность невысока (Richiardone et al., 2002). Были разработаны и другие акустические и оптические методы (например, Underwood et al., 2017), но они пока не подходят для оперативной метрологии.

Термометры, показывающие текущее значение температуры, часто называют обычными термометрами, а указывающие экстремальные значения температуры за некоторый промежуток времени — максимальными либо минимальными термометрами. Если измерение температуры производится с помощью электрических термометров, максимальная и минимальная температура может быть определена на основе измеренных данных в том случае, если обеспечена непрерывная запись и достаточная частота измерений. Поскольку единственной жидкостью для жидкостных стеклянных максимальных термометров является ртуть, следует использовать электрические альтернативы.

Описание конструкций приборов и лабораторных методов измерения температуры можно найти в различных сборниках (например, Harrison, 2015; Jones, 1992). При рассмотрении методов термометрии, следует учитывать, что для метеорологических задач применимы только специальные технологии в связи с ограничениями, обусловленными характерными особенностями климата или окружающей среды.

2.1.4.2 Общие требования к размещению

2.1.4.2.1 Измерение температуры воздуха

Для получения репрезентативных результатов при сравнении показаний термометра в различных местах и в разное время также крайне необходимо стандартное расположение будки и самого термометра. При проведении обычных метеорологических наблюдений измеряемая температура должна отражать условия ненарушенного потока воздуха на высоте между 1,25 и 2 м над уровнем земли на возможно большей площади, окружающей станцию. В целях обеспечения сопоставимости измерения должны проводиться над естественной поверхностью земли, предпочтительно над травяным покровом. Высота над уровнем земли указывается потому, что в более низких слоях атмосферы могут существовать значительные вертикальные градиенты температуры, что может повлиять на измерение температуры. Следовательно, наиболее подходящее место для проведения измерений находится над уровнем земли. Оно должно быть открыто воздействию солнца и ветра и не заслоняться деревьями, зданиями и другими препятствиями. Места на крутом склоне или в низине подвержены воздействию нетипичных условий, и их следует избегать. В больших и малых городах местные особенности более ярко выражены, чем в сельских районах. Данные наблюдений за температурой на крышах зданий имеют сомнительную точность и ценность вследствие наличия переменного вертикального градиента температуры и влияния самого здания на распределение температуры.

Классификация выбора места для наземных станций приземных наблюдений (см. настоящий том, глава 1, приложение 1.D) предоставляет дополнительное методологическое руководство по выбору места и расположению термометра в этом месте для обеспечения оптимальной репрезентативности.

2.1.4.2.2 Измерение температуры почвы

Температура почвы измеряется на следующих стандартных глубинах: 5, 10, 20, 50 и 100 см ниже поверхности; кроме перечисленных, можно устанавливать термометры и на других глубинах (например, 2 см). Такие измерения должны проводиться на ровном участке оголенной земли (размером примерно 2 м x 2 м), являющимся типичным для

почвы, по которой необходима информация. Если земля покрыта снегом, желательно производить также измерения температуры снежного покрова. Там, где снег неплотный, его можно удалить перед снятием показаний, а затем вернуть на место.

При описании места для измерения температуры почвы следует указать тип почвы, почвенный покров, а также степень и направление уклона поверхности земли. По возможности необходимо указывать физические постоянные почвы, такие, как объемная плотность, удельная теплопроводность и полевая влагемкость. Следует также указывать уровень грунтовых вод (при залегании в пределах 5 м от поверхности) и структуру почвы. Это важно для оценки потока тепла в почве при ЧПП.

На агрометеорологических станциях желательно вести непрерывную запись температуры почвы, а также температуры воздуха на различных уровнях приземного слоя (от уровня земли до примерно 10 м над верхней границей преобладающей растительности).

2.1.4.2.3 Измерение минимальных температур (травостой или оголенная почва)

Минимальная температура воздуха в травостое является самой низкой температурой, которой достигает за ночь термометр, установленный под открытым небом непосредственно над низкой травой. Минимальная температура воздуха в травостое должна измеряться на высоте 5 см над травой или поверхностью, характерной для данной местности.

Если ведутся наблюдения минимальной температуры почвы, лишенной растительности, эти измерения следует проводить на 5 см выше естественного уровня оголенной почвы.

Если земля покрыта снегом, термометр следует устанавливать над поверхностью снега — как можно ближе к поверхности снега, но так, чтобы он не касался ее. На станциях с устойчивым снежным покровом различной высоты можно использовать подставки, позволяющие поднимать или опускать термометры с целью установки их на правильной высоте над поверхностью снега.

2.1.4.3 Источники погрешностей — общие замечания

Погрешности при измерении температуры могут быть вызваны следующими причинами:

- a) прямое и косвенное излучение от различных источников, например, солнца, облаков, почвы и окружающих предметов и озер;
- b) погрешность чувствительного элемента, прибора и для электрических измерений, выполненных другими техническими устройствами в цепочке данных;
- c) недостаточная вентиляция термометрической будки (скорость ветра менее $1 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$), особенно в условиях высокой солнечной радиации;
- d) психрометрическое охлаждение из-за влажных поверхностей термометрической будки и/или датчика;
- e) загрязнение датчика, например, грязью, брызгами морской воды;
- f) неправильная эксплуатация, например, пренебрежение необходимостью достижения устойчивого равновесия или ошибки считывания показаний наблюдателем.

Постоянная времени датчика, время усреднения выходного результата и потребности в данных должны быть взаимно согласованными.

Восприимчивость различных типов температурных датчиков к каждому из вышеперечисленных факторов различается, так же, как и значимость этих факторов; эти особенности рассматриваются далее в соответствующих разделах этой главы.

Ввиду высокой значимости погрешностей, связанных с излучением, для температурных измерений, в следующих параграфах они рассматриваются более подробно.

Погрешности, связанные с излучением, возникают из-за прямого нагрева термометра электромагнитным излучением (ЭМИ), которое свободно проходит через воздух. Эффект нагрева возникает как в результате прямого облучения — из-за видимого света, проникающего в будку термометра, — так и в результате теплового излучения из-за разности температур между термометром и окружающей его средой. Поглощение излучения в этих двух диапазонах определяет величину радиационной «нагрузки» на датчик. Нагрузка определяется интенсивностью излучения в каждом диапазоне и излучательной способностью поверхности датчика, которая обычно меняется в зависимости от длины волны излучения. Тем не менее, тепловая нагрузка всегда минимизируется за счет полированной (то есть блестящей) поверхности с низкой излучающей способностью.

Измерение температуры воздуха с помощью контактных датчиков особенно чувствительно к радиационной нагрузке из-за слабого теплового контакта между датчиками и воздухом, особенно при медленном движении воздуха. Тепловой поток между термометром и воздухом характеризуется коэффициентом теплопередачи h (Çengal and Ghajar, 2014; Incropera and de Witt, 2011), который зависит от скорости воздуха, проходящего рядом с термометром, и диаметра термометра. Для многих термометров цилиндрической или сферической формы перенос тепла выражается как квадратный корень скорости воздуха рядом с термометром и обратно пропорционален квадратному корню диаметра термометра (Ney et al., 1960; Erell et al., 2005; Harrison, 2015). Таким образом, при любой скорости воздуха погрешность, связанная с излучаемой тепловой нагрузкой, уменьшится в два раза, если диаметр датчика уменьшить в четыре раза.

Сила радиационной связи между термометром и окружающей средой нередко занижается. Для цилиндрических датчиков с корпусом из нержавеющей стали будка, которая на 3 °C теплее воздуха, при скорости ветра 0,1 м·с⁻¹ даст погрешность ~0,5 °C для датчика диаметром 6 мм, но только ~0,2 °C для датчика диаметром 1 мм.

2.1.4.4 ***Уход за приборами — общие положения***

Рассмотрим следующие процедуры по техническому обслуживанию приборов:

- a) датчики и их защитные оболочки должны содержаться в чистоте для уменьшения погрешности, связанной с излучением;
- b) если используются будки с искусственной вентиляцией, необходимо регулярно проверять состояние вентилятора, вручную или, предпочтительно, автоматически;
- c) все датчики температуры и, если применимо, электрические интерфейсы необходимо регулярно калибровать. В промежутках между калибровкой следует проводить проверки в полевых условиях;
- d) при использовании аналого-цифровых преобразователей (АЦП) их следует регулярно проверять с помощью омического сопротивления, чтобы определить, соответствуют ли они по-прежнему требованиям.

Подробные требования к обслуживанию различных типов описываемых в настоящей главе термометров приводятся в соответствующих разделах.

2.1.4.5 **Последствия Минаматской конвенции с точки зрения измерения температуры**

Минаматская конвенция ЮНЕП о ртути вступила в силу во всем мире в августе 2017 года и запрещает любое производство, импорт и экспорт стеклянных ртутных термометров (см. настоящий том, глава 1, 1.4.1). В связи с этим больше не рекомендуется применять стеклянные ртутные термометры, и настоятельно поощряются надлежащие меры для их скорейшей замены на современные альтернативы. Электрические термометры сопротивления представляют собой экономичную, точную и надежную альтернативу своим опасным ртутным предшественникам и обеспечивают значительные преимущества в плане хранения данных и отображения информации в режиме реального времени.

2.2 ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ТЕРМОМЕТРЫ

2.2.1 **Общее описание**

Электрические приборы приобретают все большую популярность в метеорологии при измерении температуры. Основное их достоинство заключается в том, что выходной сигнал можно использовать в дистанционной индикации, записи, хранении и передаче данных температуры. Наиболее часто используются такие чувствительные элементы, как ПТС, но также применяются полупроводниковые термометры (термисторы) и термопары.

2.2.1.1 **Металлические термометры сопротивления**

Во всем метеорологическом диапазоне температур от $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ электрическое сопротивление большинства чистых металлов является почти линейной функцией температуры. Хотя в термометрии могли бы применяться многие чистые металлы, чаще всего для электрических термометров сопротивления используется платина из-за ее исключительной устойчивости к коррозии. Сверхчистая платина без напряжений используется для так называемых ЭПТС, которые применяются для интерполяции между фиксированными точками при реализации МТШ-90 в эталонных лабораториях. Однако эти термометры слишком хрупкие, чтобы применять их в полевых условиях.

Наиболее распространенный формат ПТС называется Pt100, поскольку датчики разработаны так, что их сопротивление R_0 близко к 100 Ом при $0\text{ }^{\circ}\text{C}$. В этих датчиках используется чуть менее чистая платина, и они гораздо более надежны, чем ЭПТС. Как правило, датчики состоят из платиновой проволоки, обмотанной вокруг керамического сердечника, и помещены внутрь корпуса из керамики, стекла или нержавеющей стали (рис. 2.1 а)). В качестве альтернативы, тонкие платиновые пленки наносятся в виде лабиринта на керамическую подложку, а затем, как правило, помещаются в корпус из нержавеющей стали (рис. 2.1 б)).



Рисунок 2.1. а) ПТС с проволоочной намоткой; б) тонкопленочный ПТС

В диапазоне от -80 °С до 60 °С электрическое сопротивление ПТС может быть представлено уравнением Каллендара — Ван Дьюзена:

$$R = R_0 (1 + At + Bt^2 + C(t - 100)t^3) \quad (2.2)$$

где t – температура в °С.

Датчики Pt100 обычно характеризуются допуском, в пределах которого они соответствуют стандартам, таким как МЭК 60751 (DIN EN 60751) или ASTM E1137. Для термометра, близко соответствующего спецификации МЭК 60751, коэффициенты Каллендара — Ван Дьюзена составляют $R_0 = 100 \text{ Ом}$, $A = 3,908 \times 10^{-3} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ и $B = -5,80 \times 10^{-7} \cdot ^\circ\text{C}^{-2}$, а коэффициент C принимает различные значения выше и ниже 0 °С. Ниже 0 °С его значение составляет $C = 4,27 \times 10^{-12} \cdot ^\circ\text{C}^{-4}$, а выше 0 °С C в точности равен нулю.

Сопротивление и чувствительность датчика Pt100 по стандарту МЭК показаны на рисунке 2.2.

Чувствительность термометров Pt100 описывает изменение сопротивления при изменении температуры и обычно задается значением (альфа), определяемым следующим образом:

$$\alpha = \frac{R_{100} - R_0}{100^\circ\text{C} * R_0} \quad (2.3)$$

Чувствительность (рис. 2.2 б)) практически не зависит от температуры и составляет 0,3952 Ом·°С⁻¹ при -40 °С, 0,3909 Ом·°С⁻¹ при 0 °С и 0,3863 Ом·°С⁻¹ при 40 °С, что составляет всего 2,3 % в диапазоне 80 К. Для термометров, соответствующих стандарту МЭК 60751, это значение близко к $3850 \times 10^{-6} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$.

Классы допуска МЭК 60751 или ASTM E1137 приведены в таблице 2.1 и изображены на рисунке 2.3. Также выпускаются датчики с меньшим допуском, который обычно указывается в виде доли одного из стандартов, приведенных в таблице 2.1.

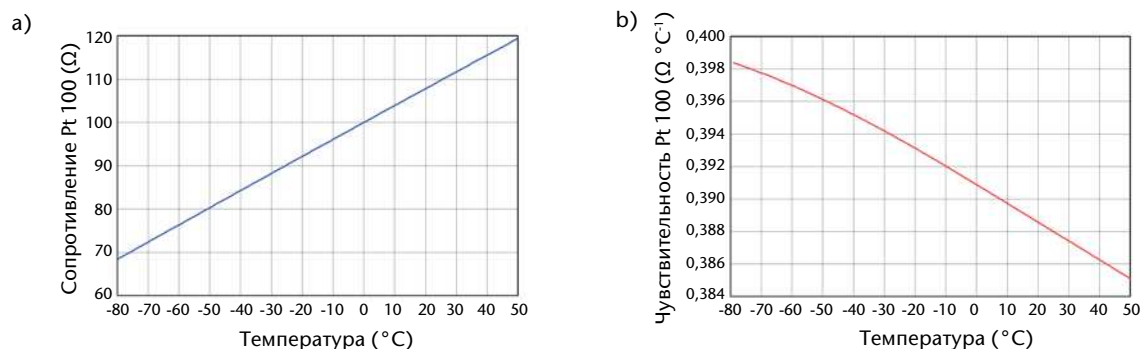


Рисунок 2.2. а) Сопротивление в зависимости от температуры для датчика Pt 100, соответствующего стандарту МЭК 60751; б) чувствительность в зависимости от температуры для датчика Pt 100, соответствующего стандарту МЭК 60751

Таблица 2.1. Классы допуска по МЭК 60751 или ASTM E1137.

МЭК 60751 (2008 г.)		ASTM E1137	
Класс допуска	Определение	Класс точности	Определение
F0,3 (старый класс B)	$\pm(0,3 + 0,005 t)$	B	$\pm(0,25 + 0,0042 t)$
F0,15 (старый класс A)	$\pm(0,15 + 0,002 t)$	A	$\pm(0,13 + 0,0017 t)$
Примечание: в спецификации МЭК символ F обозначает тонкопленочный датчик и заменен на символ W, который обозначает датчик с проволоочной обмоткой. $ t $ обозначает абсолютное значение температуры в градусах Цельсия.			

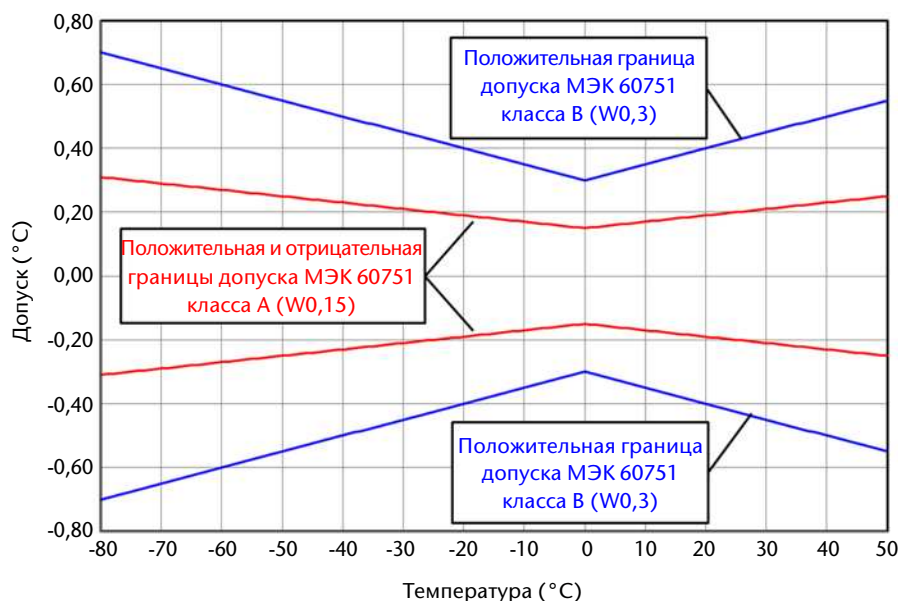


Рисунок 2.3. Диапазоны допусков для датчика Pt100, соответствующего стандарту МЭК 60751.

Например, МЭК 60751 для датчика W0,3 (старый класс В) описывает датчик с проволоочной обмоткой, который соответствует кривой МЭК 60751 в пределах $\pm(0,3 + 0,005t)$ °С, и при температуре 20 °С датчик класса В будет гарантированно находиться в пределах 0,400 °С от кривой МЭК.

Уравнение Каллендара — Ван Дьюзена (уравнение 2.2) не имеет простого обратного уравнения, в котором температура была бы выражена как функция сопротивления, $t(R)$. Есть два решения этой проблемы. Во-первых, для температур выше -40 °С член C в уравнении 2.2 соответствует менее чем 0,01 °С и во многих видах практического применения им можно разумно пренебречь. В этом случае уравнение Каллендара — Ван Дьюзена может быть аппроксимировано следующим образом:

$$R = R_0 (1 + At + Bt^2) \quad (2.4)$$

Более того, его обратная величина может быть вычислена с помощью стандартных квадратичных формул:

$$t = -\frac{A}{2B} + \frac{A}{2B} \sqrt{1 - \frac{4B}{A^2} \left(1 - \frac{R}{R_0}\right)} \quad (2.5)$$

Погрешность при использовании этой формулы по-прежнему составляет менее 0,1 °С при -80 °С. В качестве альтернативы уравнение 2.4 можно использовать для получения начальной оценки температуры, которая затем итеративно уточняется путем повторного использования прямого уравнения для R .

Перед калибровкой для установки в метеорологических условиях датчики Pt100 обычно «состариваются» (производителями) путем циклического изменения температуры в пределах от точки замерзания до 20 °С. Смысл этой процедуры в том, чтобы выявить любые дефекты производства до установки датчика и снять напряжение с проводов, которые впоследствии будут работать в полевых условиях.

2.2.1.2 Термисторы

Другим типом термометра сопротивления, который имеет широкое использование, является термистор. Хотя существуют термисторы с положительными температурными коэффициентами сопротивления, у наиболее распространенной и удобной формы

большие отрицательные коэффициенты сопротивления. Состав термисторов представляет собой коммерческую тайну, но обычно они изготавливаются из порошкообразных окисей металлов в виде небольших дисков, брусков или шариков и часто имеют стеклянное покрытие для предотвращения химических реакций с воздухом, особенно с влажным.

Зависимость сопротивления R термистора от температуры качественно можно описать следующим образом:

$$R = R_0 \exp\left(-\beta \left[\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T}\right]\right) \quad (2.6)$$

где R_0 — сопротивление термистора при абсолютной температуре T_0 (в кельвинах), а T — температура термистора в кельвинах. Термисторы обычно обозначаются по значению R_0 при температуре 25 °C, то есть $T_0 = 25 + 273,15 = 298,15$ K, которая указывается в кельвинах. Типичные значения составляют $R_0 \approx 1$ кОм и $\beta \approx 4000$ K (например, см. рис. 2.4).

Есть три ключевых отличия в поведении термисторов по сравнению с датчиками Pt100.

Во-первых, это высокое сопротивление термисторов, часто достаточно высокое, чтобы можно было пренебречь сопротивлением соединительных проводов. Это практически никогда не относится к датчикам Pt100, для которых всегда необходимо проводить измерения с помощью четырех проводов.

Второе отличие состоит в высокой чувствительности по сравнению с датчиками Pt100. Хотя это является преимуществом при любой конкретной температуре, тот факт, что чувствительность изменяется с температурой, представляет собой трудности и приводит к нелинейному поведению, а весьма высокий динамический диапазон датчиков также создает проблемы при обработке сигнала.

Наконец, датчики могут быть очень маленькими, поэтому они могут иметь малую постоянную времени и высокие коэффициенты теплопередачи (Erell et al., 2005). Однако у очень маленьких термисторов имеется недостаток, который заключается в более высоком

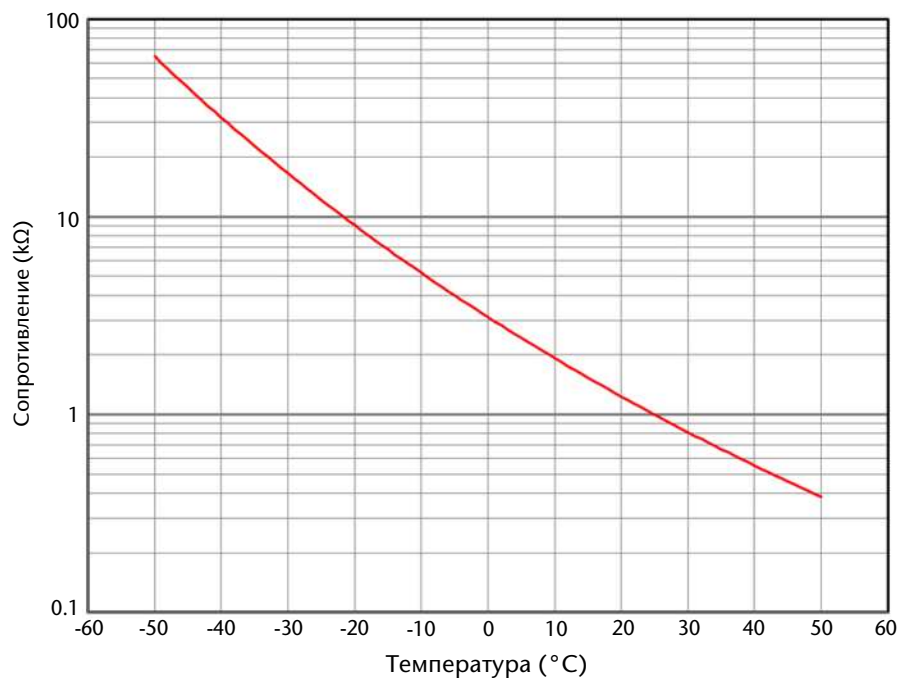


Рисунок 2.4. Зависимость сопротивления от температуры для термистора с $R_0 = 1$ кОм и 3700 K. (Обратите внимание, что вертикальная ось логарифмическая.)

эффекте самонагрева при заданной энергии диссипации, чем у более крупных термометров. Таким образом, необходимо принимать меры для того, чтобы поддерживать энергию диссипации на низком уровне.

Следует отметить, что хотя уравнение 2.6 описывает общее поведение термисторов и полезно для интерполяции на небольших интервалах температур, оно недостаточно точно, чтобы использовать его для метеорологических целей. Несколько выражений общего вида:

$$R = R_0 \exp \left(A + \frac{B}{T} + \frac{C}{T^2} + \frac{D}{T^3} \right) \quad (2.7)$$

обычно используются для более точного описания поведения термисторов, чем уравнение 2.6. Частный случай уравнения 2.7, когда коэффициент C равен нулю, известен как уравнение Стейнхарта — Харта. Для каждого датчика путем калибровки должны быть определены коэффициенты R_0 , A , B , C (если используются) и D . Эквивалентным обратным выражением для температуры является следующее:

$$T = \left[A' + B' \ln \left(\frac{R}{R_0} \right) + C' \ln \left(\frac{R}{R_0} \right)^2 + D' \ln \left(\frac{R}{R_0} \right)^3 \right]^{-1} \quad (2.8)$$

где параметры A' , B' , C' и D' полностью отличаются от параметров A , B , C и D в уравнении 2.7. Необходимо помнить, что в обоих уравнениях 2.7 и 2.8 температура T должна быть выражена в кельвинах.

В общем случае обратная формула не так точна, как прямая, и если для расчета температуры используется компьютер, то часто целесообразно повторять прямую формулу (уравнение 2.7), чтобы получить правильный результат. Было разработано множество итерационных схем, которые были оптимизированы для точности и скорости, а ниже изложен типичный подход. Согласно этой процедуре, сначала предполагается, что правильная температура находится в средней точке диапазона калибровки, и сопротивление, соответствующее этому предположению, рассчитывается с помощью уравнения 2.7.

Если это сопротивление больше измеренного, то делается новое предположение о температуре в верхней половине диапазона калибровки.

Если это сопротивление меньше измеренного, то делается новое предположение о температуре в нижней половине диапазона калибровки.

Исходя из второго предположения о температуре рассчитывается новое значение сопротивления, и в зависимости от величины этого сопротивления по сравнению с измеренным сопротивлением делается третье предположение о температуре. Для прекращения процесса итерации должны быть выполнены критерии итерации. Таким образом, температура может быть определена по измеренному сопротивлению с использованием только прямой формулы 2.7.

2.2.1.3 **Термопары**

Эффект Зеебека описывает явление, при котором градиент температуры в металле приводит к появлению сопутствующего электрического поля. Величина сопутствующего электрического поля всегда пропорциональна градиенту температуры, но зависит от коэффициента Зеебека, обусловленного материалом и температурой (Nicholas and White, 1993; Bentley, 1998). Так, проволока из чистого материала в градиенте температуры самопроизвольно приобретает напряжение на концах, величина которого равна интегральному напряжению Зеебека вдоль проволоки.

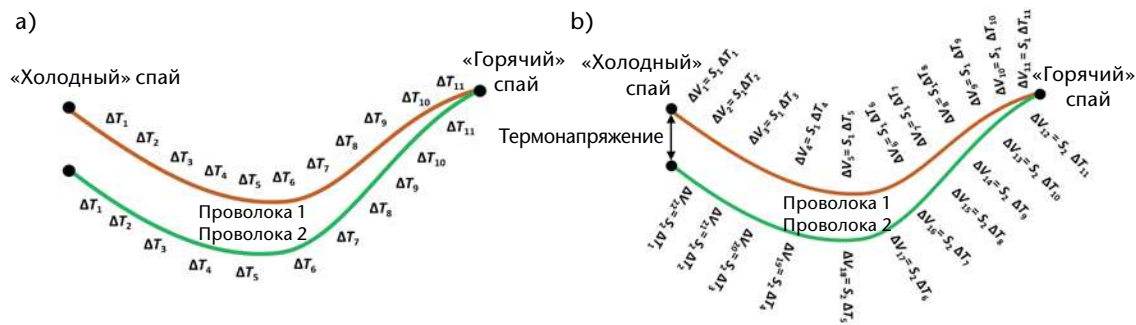


Рисунок 2.5. При градиенте температуры (а) напряжение генерируется (б) по всей длине обоих проводов.

Термопара (рис. 2.5) изготавливается из двух проводов из разных материалов с разными коэффициентами Зеебека, соединенных на одном конце — так называемом «горячем спае». Обычно открытые концы спаев подключаются к клеммам вольтметра высокого разрешения.

Термонапряжение термопары генерируется непрерывно по всей длине проводов. Можно считать, что каждый провод в термопаре испытывает последовательность небольших изменений температуры, ΔT_i (рис. 2.5 а)). При каждой небольшой разности температур ΔT_i возникает напряжение ΔV_i пропорциональное ΔT_i и коэффициенту Зеебека, S , обусловленному материалом и температурой (рис. 2.5 б)). Термонапряжение, измеренное на открытых концах термопар, пропорционально разности температур между открытыми концами проволоки и спаем термопары, даже если на спае не генерируется напряжение. Обратите внимание, что термины «горячий» и «холодный» спай совершенно условны, так как термопары могут измерять температуру даже тогда, когда «горячий спай» холоднее «холодного спае».

Важно подчеркнуть, что термонапряжение генерируется по всей длине проводов термопары и что напряжение не генерируется на самом спае — там, где измеряется температура. Спай термопары просто соединяет два провода термопары вместе и может быть получен путем сварки или спайки двух проволок. Необходимо только создать достаточно прочное электрическое соединение между проволоками.

Провода термопары можно провести очень узко, а спаи сделать очень маленькими, что обеспечивает три потенциальных преимущества. Во-первых, можно изготовить термопары, время отклика которых в воздухе будет значительно меньше одной секунды. Во-вторых, малый размер также улучшает теплообмен с воздухом, что приводит к меньшим погрешностям при облучении термопары (Bugbee et al., 1996). Наконец, снижается эффект теплопроводности вдоль проводов термопары.

Термопары изготавливаются либо из «простых металлов» (обычно сплавы меди или никеля), либо из «благородных металлов» (обычно сплавы платины, родия или золота). В метеорологических применениях использование термопар из благородных металлов не дает преимуществ. Термопары обычно приобретаются в виде готового изделия с двумя проводами, предварительно выбранными из стандартных комбинаций сплавов, которые имеют буквенное обозначение.

В метеорологических применениях наиболее часто используются следующие типы по классификации МЭК 60584-1:2013:

- тип К: изготавливается из двух никелевых сплавов — хромеля и алюмеля;
- тип J: изготавливается из железа и константана (медно-никелевый сплав);
- тип Т: изготавливается из меди и константана.

В метеорологическом диапазоне температур использование того или другого типа не дает особых преимуществ. Тип К является наиболее распространенным, и при температуре 20 °С он производит сигнал приблизительно 40 мкВ °С⁻¹. Тип J имеет чуть более высокую чувствительность (приблизительно 50 мкВ °С⁻¹), но часть из чистого железа потенциально подвержена коррозии при длительном воздействии. Тип Т имеет такую же чувствительность, как и тип К, но медная проволока имеет высокую теплопроводность, что может привести к ошибкам при некоторых обстоятельствах.

Таблицы зависимости термонапряжения от температуры для стандартных типов термопар можно получить у производителей и в органах по стандартизации.

2.2.2 Порядок проведения измерений

2.2.2.1 Электрические термометры сопротивления

Электрические термометры сопротивления могут подключаться к различным электрическим измерительным цепям. Исторически сложилось так, что многие варианты мостовых схем для измерения сопротивления использовались как в равновесном, так и в неравновесном виде. В таких схемах одно измерение напряжения или тока позволяет сравнить неизвестное сопротивление термометра с известными эталонными резисторами, не зависящими от температуры.

Отличное разрешение и линейность современных АЦП, а также измерительный компонент в вольтметрах и мультиметрах позволяют использовать альтернативные подходы. Неизвестное сопротивление термометра оценивается по результатам двух измерений; измерение тока, протекающего через датчик температуры; и измерение напряжения на датчике температуры. Это позволяет измерять сопротивление около 100 Ом с погрешностью всего в несколько мОм.

Необходимо также учитывать сопротивление проводов, соединяющих датчик с АЦП. Обычно электрическое сопротивление таких проводов составляет несколько десятых долей ома на метр. Для датчика Pt100 дополнительное сопротивление в 0,39 Ом эквивалентно ошибке в 1 °С. Поэтому для датчиков Pt100 необходимо проводить измерения с помощью четырехпроводной конфигурации, в которой дополнительная пара проводов определяет напряжение (рис. 2.6).

Погрешность термистора, обусловленная соединительными проводами, сильно колеблется в зависимости от температуры, но, как правило, она гораздо менее значительна, чем для датчиков Pt100. Для датчика с $R_0 = 1$ кОм и температурой $\beta = 3700$ К, показанного на рис. 2.4, при -20 °С сопротивление датчика составляет 9,08 кОм, а чувствительность -542 Ом °С⁻¹, т.е. изменение составляет 6,0 % °С⁻¹, в то время как при 20 °С сопротивление датчика составляет 1,24 кОм, а чувствительность -55 Ом °С⁻¹, т.е. изменение составляет 4,4 % °С⁻¹. Таким образом, при -20 °С дополнительное сопротивление 0,39 Ом эквивалентно погрешности в 0,0007 °С, а при 20 °С — погрешности в 0,007 °С, что во многих случаях можно считать незначительным.



Рисунок 2.6. Четырехпроводная схема для считывания показаний датчика Pt100

Чтобы сохранить преимущества термисторов, такие как быстрый отклик и высокий коэффициент теплопередачи, но избежать недостатков высокого динамического диапазона и меняющейся чувствительности, термисторы часто используются в схемах «линеаризации». Существует большое количество таких схем, но самая простая из них состоит из параллельного постоянного резистора (White, 2015, 2017).

2.2.2.2 Термопары

Исторически термопары использовались в самых различных конфигурациях, в которых открытые концы термопары — так называемый «холодный спай» — нужно было погружать в тающий лед (рис. 2.7 а)). Затем температура горячего спая вычислялась из стандартных таблиц для пары металлов, используемых в термопаре. На практике поддерживать точку замерзания неудобно, и сейчас это делается крайне редко.

Вместо этого измерения соотносятся с температурой клемм цифрового вольтметра. В этом методе, который называется компенсацией холодного спая, необходимо измерять температуру клемм вольтметра с помощью термистора или ПТС (рис. 2.7 б)). Затем рассчитывается дополнительное ожидаемое напряжение термопары при использовании точки замерзания, которое добавляется к измеренному напряжению. Затем эта сумма используется для определения температуры с помощью интерполяции стандартных таблиц. При использовании компенсации холодного спая необходимо соблюдать особую осторожность вблизи стыков вольтметра, где небольшая разность температур между клеммами может вызывать паразитные напряжения.

Обычно покупная термопара имеет недостаточную длину для подключения к вольтметру в изолированном от воздействия окружающей среды корпусе, и для этого нужен так называемый «удлинительный кабель». Как отмечалось выше, термонапряжение генерируется по всей длине термопары, включая любой удлинительный кабель. Поскольку температурные градиенты в кабеле нередко выше всего вблизи огороженного пространства, где находится оборудование для сбора данных, термонапряжения, генерируемые в удлинительном кабеле, настолько же существенны, что и термонапряжения, генерируемые вблизи горячего спая термопары. По этой причине термопары обычно не выбирают для обычного метеорологического использования.

В метеорологии термопары используются для термометрии в двух особых случаях. Во-первых, они используются тогда, когда для особых исследовательских задач необходим термометр с малой массой и очень малой постоянной времени (см., например, Bugbee et al., 1996). Во-вторых, они применяются для измерения небольших разностей температур; для этого термопара подключается встречно как две термопары (рис. 2.8 а)). В такой конфигурации измеряемое напряжение чувствительно только к разности температур двух спаев. «Термоэлектрическая батарея» представляет собой модификацию

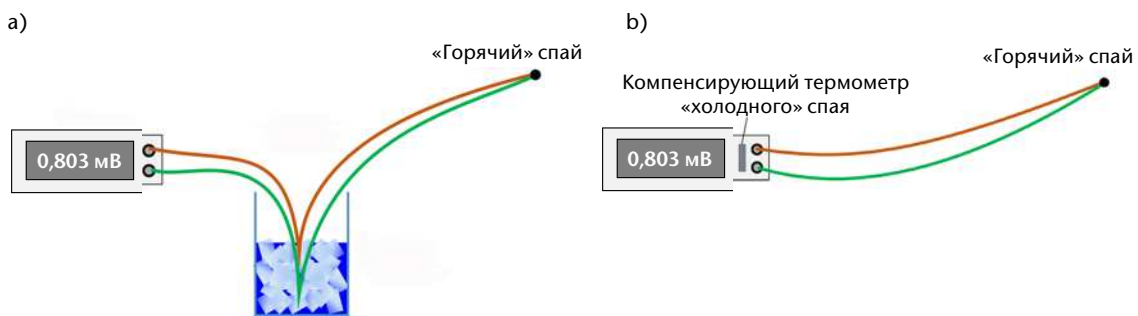


Рисунок 2.7. Схемы для считывания показаний термопары: а) одно из нескольких традиционных приспособлений, в котором холодный спай погружается в тающий лед; б) современный вариант, в котором термистор или термометр Pt100 измеряет температуру «холодного спая».

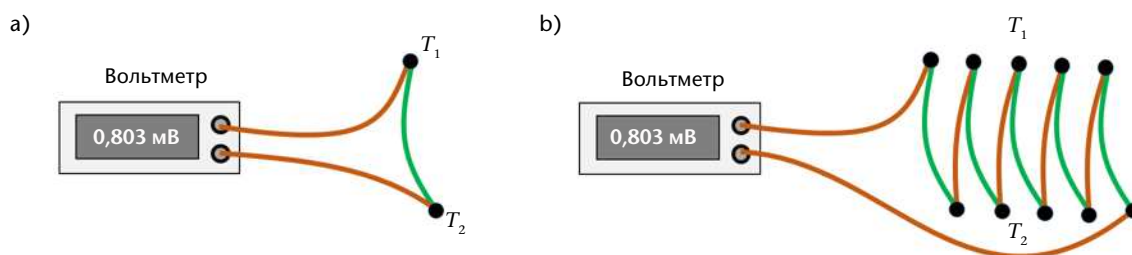


Рисунок 2.8. Использование термопары в дифференциальном режиме:
 а) дифференциал между двумя спаями; б) термоэлектрическая батарея

дифференциальной термопары (рис. 2.8 б)) и состоит из большого количества дифференциальных термопар, соединенных последовательно. Выходное напряжение от термобатареи из N спаев в N раз превышает выходное напряжение от одной термопары, а для 10 спаев оно может приближаться к $400 \text{ мкВ} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$. Это позволяет с высоким разрешением определять очень малые разности температур, например, такие, которые возникают в пиранометре.

2.2.3 Размещение и установка

Общие требования к размещению и установке термометров описаны в разделе 2.1.4.2. Дополнительные требования включают следующее:

- измерение экстремальных температур: если электрический термометр соединить с непрерывно действующей системой записи данных, то максимальные и минимальные термометры больше не потребуются;
- измерение приземных температур (минимальный термометр для измерения температуры оголенной почвы или травостоя): по своим радиационным свойствам электрические термометры отличаются от жидкостных стеклянных термометров. Электрические термометры, установленные для измерения минимальной температуры воздуха в травостое (или на другой поверхности), будут записывать значения температур, отличные от показаний, установленных таким же образом обычных термометров. Эти различия можно свести к минимуму посредством установки электрического термометра в стеклянной защитной оправе того же диаметра, что и заменяемые термометры;
- измерение температуры почвы: электрические термометры помещаются в латунные оправы и погружаются на необходимую глубину в ненарушенный вертикальный слой почвы, полученный в результате проходки открытым способом. Электрические соединения помещают в пластиковые трубки, проходящие в шурфе, который затем заполняют таким образом, чтобы по возможности восстановить первоначальный слой почвы и ее дренажные характеристики.

2.2.4 Источники ошибки

2.2.4.1 Электрические термометры сопротивления

Основными источниками погрешностей при измерении температуры электрическими термометрами сопротивления являются:

- самонагревание элемента термометра;
- неадекватная компенсация сопротивления выводов;

- c) неадекватная компенсация нелинейности датчика или обрабатывающего прибора;
- d) резкие изменения контактного сопротивления при переключении.

Самонагревание происходит вследствие того, что при прохождении тока через элемент сопротивления он нагревается и, следовательно, температура элемента термометра становится выше, чем температура окружающей среды. При токе в 1 мА (10 мА) в датчике Pt100 нагрев составляет приблизительно 0,1 мВт (10 мВт). Для датчика диаметром 6 мм и длиной 30 мм при скорости ветра $1 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$ коэффициент теплопередачи составит приблизительно $40 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{К}^{-1}$, а результирующий нагрев датчика составит от 0,004 К до 0,4 К.

Сопротивление соединительных проводов вносит погрешность в показания термометра. Эта погрешность становится более значительной при длинных проводах, например, когда термометры сопротивления расположены на некотором расстоянии от измерительного прибора; различные погрешности возникают также при изменении температуры кабеля. Для уменьшения погрешностей настоятельно рекомендуется использовать измерения с помощью четырехпроводных термометров Pt100.

Ни электрический термометр сопротивления, ни термистор не отвечают требованиям линейности во расширенном диапазоне измеряемых температур. Если для электрических термометров сопротивления выходной сигнал можно считать приближенно линейным для ограниченного диапазона, то для термисторов необходимо предусмотреть соответствующую компенсацию таких нелинейностей (White, 2016).

По мере старения переключателей могут возникнуть резкие изменения контактного сопротивления при переключении. Изменения могут варьировать и могут остаться незамеченными, если не проводить регулярные поверки системы (см. раздел 2.2.5).

2.2.4.2 **Термопары**

Основная неопределенность, возникающая при использовании термопар, связана с распределенным характером генерации термоэлектрического напряжения. Как показано на рисунке 2.5, измеряемое напряжение генерируется по всей длине термопары вместе с ее удлинительными проводами. Для этого состав сплава тонких проволок должен быть крайне однородным. Кроме того, затем термопару необходимо откалибровать с учетом температурных градиентов, которым она будет подвергаться в процессе эксплуатации.

Кроме того, вторичное измерение температуры, используемое для компенсации холодного спая, вносит неизвестную погрешность, основанную на окружающей среде АЦП в вольтметре или системе сбора данных.

Для метеорологических установок нецелесообразно проводить надлежащую калибровку, а эффективность компенсации холодного спая нельзя оценить без дополнительной информации. По этим причинам не рекомендуется применять термопары для в стандартных метеорологических применениях.

2.2.5 **Сравнение и калибровка**

2.2.5.1 **Электрические термометры сопротивления**

Необходимо регулярно проводить калибровку термометров в лабораторных условиях в поверочных лабораториях, имеющих аккредитацию ИСО/МЭК 17025. Термометры следует сравнивать с эталонными термометрами, что обычно осуществляется в перемешиваемой жидкой ванне, камере искусственного климата или сухоблочном калибраторе в необходимом диапазоне температур. Дополнительная информация приводится в 2.6.

Поскольку измерительный прибор является составной частью электрического термометра, то его градуировку необходимо проверить, заменив термометр

сопротивления прецизионным откалиброванным эталоном сопротивлений и устанавливая сопротивления, эквивалентные приращениям температуры (например, 10 K) в пределах рабочего диапазона температуры. Погрешность в любой точке не должна превышать 0,1 K. Обычно эта работа выполняется специалистом технической службы.

2.2.5.2 **Термопары**

Для калибровки и проверки термопар необходимо поддерживать горячие и холодные спаи при точно известных температурах и изменять градиент между этими температурами для оценки неоднородности коэффициента Зеебека. Способы и средства измерения, необходимые для проведения этой работы, очень специфичны и здесь не приводятся (Bentley, 1998; Nicholas and White, 1993; ASTM, 1993).

2.2.6 **Поправки**

При изготовлении электрические термометры должны сопровождаться одним из следующих документов:

- a) паспорт с указанием даты, подтверждающий соответствие определенному стандарту;
- b) свидетельство о поверке с указанием даты поверки и значений фактического сопротивления или температуры (с использованием стандартных параметров Каллендара — Ван Дьюзена МЭК) в реперных точках диапазона температур. Эти значения сопротивления/температур должны использоваться для проверки погрешности измерительного прибора или интерфейса системы до и во время работы. Значение отклонения сопротивления от номинального обычно не должно превышать эквивалентную ему температурную погрешность 0,1-0,2 K.

После каждой калибровки для датчика Pt100 будет сформирована таблица значений сопротивления, R_i , при заданных температурах T_i . Эти значения можно использовать для составления таблицы поправок (ΔR_i или ΔT_i) для использования с термометром. На основе этих данных калибровки можно проверять соответствие конкретному стандарту (например, МЭК 60751), классу или диапазону допусков. Однако, чтобы правильно оценить соответствие в пределах диапазона допуска, пользователи должны дополнительно учитывать влияние погрешности измерения, u_T , связанного с калибровкой. Следует рассмотреть три случая:

- В первом случае поправка $\pm u_T$ полностью попадает в диапазон соответствия. В этом случае термометр может быть признан соответствующим спецификации. В этом случае термометр можно вернуть в эксплуатацию и вычислять его температуру по стандартной кривой МЭК 60751 со стандартными коэффициентами Каллендара — Ван Дьюзена. Для примера на рисунке 2.9 так произойдет при погрешности $u_T = 0,05$ °C.
- Во втором случае поправка $\pm u_T$ вообще не попадает в диапазон соответствия. Термометр может быть признан несоответствующим спецификации. В этом случае термометр нельзя вернуть в эксплуатацию, а датчик обычно выбрасывается.
- В третьем случае поправка $\pm u_T$ перекрывает диапазон соответствия, так что присутствует значительная вероятность того, что датчик не соответствует требованиям. В этом случае дальнейшие действия зависят от степени перекрывания. Если, по оценке, вероятность несоответствия достаточно мала, термометр может быть возвращен в эксплуатацию, а его температура определена по стандартной кривой МЭК 60751 со стандартными коэффициентами Каллендара — Ван Дьюзена. Для примера на рисунке 2.9 так произойдет при погрешности $u_T = 0,15$ °C.

Обратите внимание, что соответствие или несоответствие может зависеть от коэффициента охвата, приписываемого погрешности.

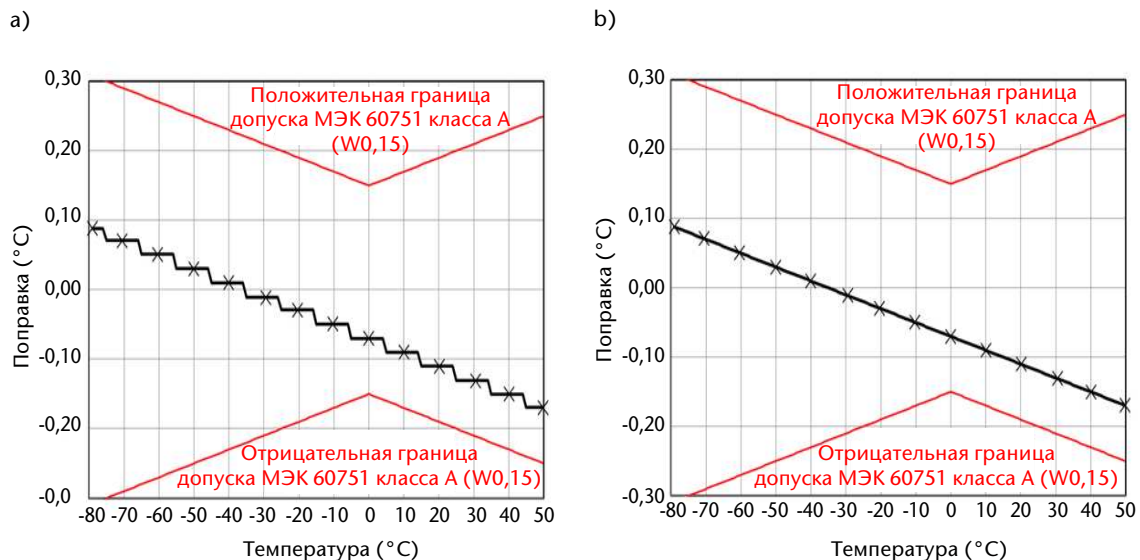


Рисунок 2.9. Схемы применения поправок, полученных на основе данных калибровки:
а) ступенчатая; б) линейная

В простейшей схеме, в которой применяются поправки, предполагается, что поправки при определенной температуре применяются ко всем температурам, которые находятся ближе к этой точке калибровки, чем к любой другой точке калибровки. Таким образом, температура определяется по сопротивлению с помощью стандартной кривой, а затем добавляется поправка. Недостаток этой схемы (рис. 2.9 а)) заключается в том, что на кривой зависимости температуры от сопротивления посередине между точками калибровки возникает разрыв.

Линейная интерполяция улучшает простую схему поправок (рис. 2.9 б)). Поправка, применяемая к конкретному измерению, рассчитывается путем линейной интерполяции между поправками из точек калибровки выше и ниже выбранной температуры. Преимущество этого метода состоит в получении непрерывной кривой зависимости температуры от сопротивления.

Более сложная обработка данных заключается в использовании этих данных для создания пользовательских параметров Каллендара — Ван Дьюзена для конкретного термометра. Эта процедура описана в (Nicholas and White, 1993).

2.2.7 Обслуживание

Регулярные проверки в условиях эксплуатации должны выявлять любые изменения в градуировке системы. Они могут быть вызваны изменениями электрических характеристик термометра со временем, старением электрических кабелей или их соединений, изменением контактного сопротивления переключателей или электрических характеристик измерительного оборудования. Для точного определения источника таких погрешностей и их корректировки требуется специальное оборудование и обучение, и эту работу должен выполнять только сотрудник по техническому обслуживанию и ремонту.

2.3 ЖИДКОСТНЫЕ СТЕКЛЯННЫЕ ТЕРМОМЕТРЫ

Ртутные стеклянные термометры получили широкое распространение, но после принятия Минаматской конвенции о ртути (см. 2.1.4.5) они больше не рекомендуются. НМГС рекомендуется принять надлежащие меры для замены ртутных стеклянных термометров на современные альтернативы (например, электрические термометры сопротивления).

Учитывая то, как развивалась термометрия в прошлом и остаточное использование ртутных стеклянных термометров, следующий текст также относится и к ртутным стеклянным термометрам.

2.3.1 Общие положения

Для обычных наблюдений за температурой воздуха, включая максимальную и минимальную температуру, а также температуру смоченного термометра, все еще широко используются жидкостные стеклянные термометры. Принцип работы таких термометров основан на различном термическом расширении чистой жидкости и стеклянного резервуара. Капилляр представляет собой трубку, тонкий внутренний канал которой соединен с резервуаром термометра; резервуар полностью заполнен термометрической жидкостью, а капилляр — лишь частично при всех измеряемых температурах. С изменением объема жидкости в резервуаре меняется и высота столбика жидкости в капилляре. При градуировке такого термометра с использованием эталонного термометра шкала наносится либо непосредственно на капилляр, либо на отдельную пластинку, прочно прикрепленную к капилляру.

Использование той или иной жидкости определяется необходимым диапазоном измерения температуры; ртуть² применялась для измерения температур, превышающих ее точку замерзания ($-38,9\text{ }^{\circ}\text{C}$), тогда как для измерения более низких температур используется этиловый спирт или другие чистые органические жидкости. Стекло должно быть обычным или боросиликатным, которые допускаются к применению в термометрах. Для того чтобы улучшить проводимость тепла от стеклянного резервуара термометра к его содержимому, стенки резервуара делают как можно тоньше с учетом практических соображений сохранения достаточной прочности. Более узкий внутренний канал капилляра обеспечивает и более быстрое перемещение жидкости в нем при заданном изменении температуры, но при этом уменьшается рабочий диапазон измерения температуры термометра при фиксированной длине капилляра. Перед градуировкой термометры необходимо подвергнуть термической обработке (обжигу), чтобы свести к минимуму медленно протекающие изменения, связанные со старением стекла.

Существуют четыре основных типа конструкции метеорологических термометров:

- a) термометр в защитной оболочке со шкалой, нанесенной на капилляре термометра;
- b) термометр в защитной оболочке со шкалой, нанесенной на пластинке из молочного стекла, прикрепленной к термометру внутри защиты;
- c) термометр без защитной оболочки со шкалой на капилляре и прикрепленный к металлической, фарфоровой или деревянной оправе обратной цифровой шкале стороной;
- d) термометр без защитной оболочки со шкалой, нанесенной на капилляре.

Капилляры некоторых термометров снабжены линзами для увеличения изображения столбика жидкости.

Типы (a) и (b) имеют то преимущество перед типами (c) и (d), что их шкалы предохранены от стирания. У термометров типа (c) и (d) шкалы, вероятно, время от времени придется подкрашивать. Однако такие термометры легче сделать, чем термометры типов (a) и (b). Типы (a) и (d) имеют преимущество, заключающееся в том, что они менее подвержены погрешностям вследствие параллакса (см. раздел 2.3.4). В публикации Управления

² Рекомендации относительно безопасного использования ртути приведены в части I, глава 3, 3.2.7. Минаматская конвенция о ртути Программы ООН по окружающей среде вступила в силу в октябре 2013 г. и окажет значительное влияние на использование ртути для метеорологических применений.

по изданию официальных документов Ее Королевского Величества/Метеорологического бюро (1980) приведен обзор термометров, предназначенных для использования в метеорологической деятельности.

В любом типе защита или оправа должна иметь малую теплоемкость, т. е. не должна быть чрезмерно громоздкой. В то же время она должна быть достаточно прочной, чтобы выдерживать нагрузки, испытываемые при эксплуатации и перевозках.

Для ртутных стеклянных термометров, особенно максимальных, важно, чтобы вакуум над столбиком ртути был близок к идеальному. Все термометры, за исключением термометров для измерения температуры почвы, должны градуироваться при полном погружении. Требования к термометрам, предназначенным для различных целей, рассматриваются в соответствующих разделах ниже.

2.3.1.1 **Обычные (станционные) термометры**

Ранее применялись очень точные ртутные стеклянные термометры. Деление его шкалы соответствует 0,2 К или 0,5 К, а шкала его длиннее, чем у других метеорологических термометров.

Обычный термометр размещается в метеорологической будке с тем, чтобы избежать погрешностей за счет радиации. Термометр устанавливается на подставке в вертикальном положении резервуаром вниз. Резервуар должен иметь форму цилиндра или сферы.

Пара обычных термометров может использоваться в качестве психрометра, если один из них обернут тканью (смоченный термометр)³ (см. настоящий том, глава 4, 4.3).

2.3.1.2 **Максимальные термометры**

В качестве максимального термометра рекомендовалось использовать ртутный стеклянный термометр, имеющий сужение внутреннего канала трубки между резервуаром и основанием шкалы. Это сужение не дает ртутному столбику смещаться вниз при понижении температуры. Термометр, однако, можно вернуть в исходное состояние — наблюдатель должен крепко держать его резервуаром вниз и стряхивать до тех пор, пока ртутный столбик не соединится. Максимальный термометр следует устанавливать под углом примерно два градуса к горизонтали, причем резервуар должен быть наклонен вниз для того, чтобы ртутный столбик проходил сужение не под действием силы тяжести. Желательно, чтобы в верхней части капилляра внутренний канал имел расширение для того, чтобы разделившийся на части ртутный столбик можно было легко соединить при стряхивании. Поскольку единственной жидкостью, подходящей для жидкостных стеклянных максимальных термометров, является ртуть, для измерения максимальной температуры следует использовать электрические альтернативы (см. 2.2).

2.3.1.3 **Минимальные термометры**

Что касается минимальных термометров, то наиболее распространенным типом такого термометра является спиртовой термометр с темным стеклянным штифтом длиной около 2 см, погруженным в спирт. Так как некоторое количество воздуха остается в трубке спиртового термометра, в верхнем ее конце должно быть предусмотрено расширение достаточных размеров для того, чтобы прибор смог выдерживать температуру 50 °С или выше без повреждений. Минимальные термометры должны устанавливаться таким же образом, как и максимальные термометры — в почти горизонтальном положении. В минимальных термометрах можно использовать различные жидкости, такие, как этиловый спирт, пентан и толуол. Важно, чтобы жидкость была как можно чище, так как

³ Подробное описание смоченных термометров приведено в настоящем томе, глава 4.

присутствие некоторых примесей увеличивает тенденцию жидкости к полимеризации под воздействием света, что с течением времени приводит к изменению градуировки. Например, при использовании этилового спирта последний не должен содержать ацетона.

Минимальные термометры используются также для измерения минимальной температуры воздуха в травостое (см. 2.1.4.2.3).

2.3.1.4 ***Почвенные термометры***

Для измерения температуры почвы на глубинах до 20 см широко применялись ртутные термометры, капилляры которых изогнуты под прямым или другим углом ниже наименьшей отметки шкалы. Резервуар термометра погружается в землю на требуемую глубину таким образом, чтобы снятие показаний осуществлялось без изменения положения термометра. Такие термометры градуируются при погружении до той глубины, на которой измеряется температура почвы. Так как остальная часть термометра находится под воздействием температуры воздуха, в конце капилляра должно быть предусмотрено расширение на случай увеличения объема ртути.

Для измерения температуры на глубинах, превышающих 20 см, рекомендовалось использовать ртутные стеклянные термометры, заключенные в деревянные, стеклянные либо пластмассовые оправы; резервуары таких термометров были покрыты воском или окрашены металлической краской. Термометры в оправе помещают в тонкостенные металлические либо пластмассовые трубки и погружают в землю на нужную глубину. В условиях холодного климата высота надземной части трубки должна быть выше наибольшей высоты снежного покрова.

Вертикальные металлические трубки не используются при измерении дневного колебания температуры почвы, особенно засушливой, так как расчеты ее тепловых свойств на основе этих измерений могут быть неправильными, потому что такие трубки будут служить в качестве проводников тепла с земной поверхностью.

Большая постоянная времени, обусловленная повышенной теплоемкостью, позволяет при вынимании термометра из трубки, в которую он вставлен, сохранять показания во время снятия отсчетов

Если земля покрыта снегом, то рекомендуется возведение небольшого помоста, расположенного параллельно ряду термометров для того, чтобы наблюдатель мог приблизиться к термометрам, не нарушая снежного покрова. Этот помост должен быть спроектирован таким образом, чтобы настил можно было убирать в промежутках между наблюдениями, не нарушая снежного покрова.

2.3.2 **Порядок проведения измерений**

2.3.2.1 ***Снятие показаний обычных термометров***

Для того чтобы избежать изменений температуры из-за присутствия наблюдателя, показания термометра следует снимать как можно быстрее. Так как мениск жидкости или штифт и шкала термометра не находятся в одной плоскости, следует быть внимательным во избежание ошибок вследствие параллакса. Это происходит, если глаз наблюдателя не находится на линии, перпендикулярной к капилляру термометра и проходящей через мениск или штифт термометра. Так как шкалы термометров обычно не имеют делений менее одной пятой градуса, снятие показаний с точностью до одной десятой градуса, что является важным для психрометрии, необходимо производить на глаз. Если имеются шкаловые поправки, то их нужно вводить в показания. Устанавливать и снимать показания максимальных и минимальных термометров следует, по крайней мере, два раза в день. Их показания надо постоянно сравнивать с показаниями обычных термометров для того, чтобы убедиться в отсутствии серьезных погрешностей.

2.3.2.2 **Измерение минимальной температуры воздуха в травостое**

Температуру измеряют минимальным термометром такого типа, который описан в разделе 2.3.1.3. Термометр следует устанавливать на соответствующих подставках так, чтобы угол его наклона к горизонтали составлял примерно 2° , причем резервуар должен быть ниже капилляра термометра; термометр должен находиться на высоте 50 мм над землей.

Обычно термометр устанавливают в последний час наблюдений перед заходом солнца, а показания снимают на следующее утро. В течение дня прибор хранится в будке или в помещении. Однако на станциях, где наблюдатель не работает в период захода солнца, приходится оставлять термометр под открытым небом на весь день. При значительной солнечной радиации это может привести к дистилляции спирта и сбору его в верхней части капилляра термометра. Этот эффект можно свести к минимуму, поместив черный металлический экран, обвернутый хлопчатобумажным лоскутом, над резервуаром термометра; такой экран поглощает больше радиации и, следовательно, достигает более высокой температуры, чем сам термометр. Таким образом, небольшое количество пара будет конденсироваться в верхней части капилляра над столбиком спирта.

2.3.3 **Размещение и установка термометров**

Как обычные, так и максимальные и минимальные термометры всегда помещают в психрометрическую будку, как это описано в разделе 2.2.3. Экстремальные термометры устанавливают на соответствующих подставках так, чтобы угол их наклона к горизонтали составлял примерно 2° , причем резервуары должны быть ниже капилляра термометра.

Выбор места и установка минимальных термометров для измерения температуры воздуха в травостое описаны в разделе 2.1.4.2.3 и 2.3.2.2.

2.3.4 **Источники погрешностей жидкостных стеклянных термометров**

К числу основных источников погрешностей, характерных для всех жидкостных стеклянных термометров, относятся следующие:

- a) погрешности упругости;
- b) погрешности, вызываемые капиллярной трубкой термометра;
- c) погрешности параллакса и грубые ошибки при снятии показаний;
- d) изменения объема резервуара термометра под воздействием внешнего или внутреннего давления;
- e) капиллярность;
- f) ошибки в делении и градуировке шкалы;
- g) различное расширение жидкости и стекла в рассматриваемом диапазоне.

Три последние погрешности могут быть сведены к минимуму изготовителем и включены в поправки, вводимые к наблюдаемым величинам. Определенного внимания требуют первые три погрешности. Погрешность (d) обычно не имеет места при использовании термометров в метеорологических целях.

2.3.4.1 ***Погрешности упругости***

Существует два вида погрешностей упругости: обратимые и необратимые. Первые имеют значение лишь при воздействии на термометр температур широкого диапазона в течение короткого промежутка времени. Таким образом, если термометр поверяется при температуре кипения воды, а через короткий промежуток времени при температуре замерзания воды, то его показания будут сначала несколько ниже правильной отметки, а затем температура медленно поднимется до нее. Эта погрешность зависит от качества используемого в термометре стекла и может достигать 1 К, но при использовании высококачественного стекла она должна составлять лишь 0,03 К, при этом она может пропорционально уменьшаться при меньших диапазонах температур. Это явление не имеет значения для метеорологических измерений, за исключением возможной ошибки при начальной градуировке.

Необратимые изменения могут иметь большее значение. Резервуар термометра имеет тенденцию со временем уменьшаться в объеме, что приводит к повышению нулевой отметки. Наибольшие изменения происходят в течение первого года, после чего темпы изменений постепенно понижаются. Степень этих изменений можно сократить посредством тепловой обработки резервуара термометра и использования более подходящего стекла. Но даже при использовании высококачественного стекла это изменение может первоначально составлять порядка 0,01 К в год. Для обеспечения точных показаний, особенно при работе с инспекторскими или контрольными термометрами, следует периодически проверять нулевую отметку и производить необходимые корректировки.

2.3.4.2 ***Погрешности, вызываемые капиллярной трубкой термометра***

Термометр, используемый для измерения температуры воздуха, обычно полностью находится в воздушной среде приблизительно одинаковой температуры, а его градуировка производится при погружении термометра полностью или до верхней отметки жидкостного столбика (т. е. градуировка при полном или частичном погружении). Если такой термометр используется для определения температуры среды, не требующей полного погружения термометра, то действительная температура трубки отличается от температуры резервуара, что приводит к погрешности.

При применении в метеорологических целях вероятнее всего это может произойти при проверке градуировки обычного термометра в сосуде с жидкостью, температура которой значительно отличается от температуры окружающей среды, и при погружении только резервуара или нижней части капиллярной трубки.

2.3.4.3 ***Ошибки параллакса и грубые ошибки при снятии показаний***

Если при снятии показаний термометра смотреть на него в плоскости, которая не перпендикулярна к капиллярной трубке термометра, то возникает ошибка параллакса. Эта ошибка находится в прямой зависимости от толщины капиллярной трубки термометра и величины угла между фактической и правильной линиями визирования. Ошибки можно избежать лишь при очень тщательном снятии показаний. При работе с вертикально расположенными в метеорологической будке стеклянными ртутными термометрами глаз наблюдателя должен находиться на горизонтальной линии, проходящей через верхнюю точку ртутного столбика.

Ошибки при снятии показаний, кроме того, могут быть обусловлены присутствием наблюдателей, в какой-то мере нарушающих состояние окружающей среды. Поэтому необходимо, чтобы наблюдатели за максимально короткое время сняли показания с точностью до десятых долей градуса. Грубые ошибки при снятии показаний составляют обычно 1°, 5° или 10°. Таких ошибок можно избежать, если наблюдатели перепроверяют десятые доли градуса и целые значения после снятия показаний.

2.3.4.4 **Погрешности, обусловленные различным расширением**

Коэффициент объемного расширения ртути равен $1,82 \cdot 10^{-4} \text{ K}^{-1}$, а для большей части стекол он колеблется от $1,0 \cdot 10^{-5}$ до $3,0 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$. Коэффициент расширения стекла, таким образом, является значимым компонентом и не может не приниматься в расчет. Поскольку ни коэффициент объемного расширения ртути и стекла, ни площадь поперечного сечения отверстия капиллярной трубки не являются абсолютно неизменными в пределах используемых диапазонов температур и длины капиллярной трубки, цена деления шкалы капиллярной трубки варьирует в зависимости от того или иного участка капиллярной трубки, поэтому изготовитель должен градуировать термометр по эталонному термометру до начала его использования.

2.3.4.5 **Погрешности спиртовых термометров**

Коэффициент расширения жидкостей, используемых в спиртовых термометрах, значительно выше, чем коэффициент расширения ртути, а точка их замерзания значительно ниже (этиловый спирт замерзает при -115°C). Спирт используется в минимальных термометрах потому, что он бесцветен и имеет более высокий коэффициент расширения, что позволяет использовать капиллярную трубку с большим отверстием. Спиртовые термометры менее точные, чем ртутные термометры той же стоимости и качества. Кроме общих недостатков, присущих всем жидкостным стеклянным термометрам, спиртовые термометры имеют свои, присущие только им недостатки:

- a) адгезия спирта на стекле: в отличие от ртути, органические жидкости обычно смачивают стекло. Следовательно, в случае резкого падения температуры определенное количество жидкости может остаться на стенках капилляра, вызывая этим понижение показаний термометра. Если термометр подвешен вертикально, то постепенно жидкость стекает в нижнюю часть капилляра;
- b) разрыв столбика жидкости: в верхней части капиллярной трубки термометра в результате испарения и конденсации часто образуются капельки жидкости. Они могут соединиться с основным столбиком, однако в период от начала этого процесса и до момента его обнаружения могут возникнуть ошибки. Разрыв столбика часто происходит также при транспортировке. Эту ошибку сокращают в процессе производства за счет запаивания термометра при самых низких значениях температуры, когда в капилляре содержится максимальное количество воздуха;
- c) медленно протекающие изменения в жидкости: органические жидкости обычно имеют тенденцию к полимеризации с течением времени и под воздействием света, что приводит к постепенному сокращению объема жидкости. Присутствие примесей ускоряет этот процесс; в частности, наличие ацетона в этиловом спирте имеет весьма пагубные последствия. В этой связи подготовка жидкости для термометров требует особой тщательности. Кроме того, использование красителей для подкрашивания жидкости с целью улучшения ее зрительного восприятия повышает возможность возникновения этого явления.

Вопросы сокращения ошибок, связанных с разрывом столбика жидкости, а также ухода за спиртовыми термометрами, рассматриваются в этой главе ниже.

2.3.5 **Сравнение и калибровка в лабораторных условиях и в условиях эксплуатации**

2.3.5.1 **Калибровка в лабораторных условиях**

Калибровку термометров в лабораторных условиях должны проводить аккредитованные согласно ИСО/МЭК 17025 поверочные лаборатории. Для жидкостных стеклянных термометров следует использовать контейнер, наполненный жидкостью, в котором можно поддерживать любую желаемую температуру в необходимых пределах. Скорость

изменения температуры внутри жидкости не должна превышать рекомендуемые пределы, а калибровочные приборы должны быть снабжены средствами для перемешивания жидкости. Эталонные контрольные термометры и калибруемые термометры, подвешенные в контейнере, не должны касаться его стенок.

Необходимо провести достаточное количество измерений, с тем чтобы быть уверенным, что необходимые корректировки соответствуют характеристикам термометра в нормальных условиях, когда ошибки, обусловленные интерполяцией, в любой промежуточной точке не превышают несистематические погрешности (см. том V, глава 4 настоящего Руководства).

2.3.5.2 **Проверка в полевых условиях**

Во всех жидкостных стеклянных термометрах происходит постепенное изменение нулевой отметки. По этой причине желательно проверять их через регулярные интервалы времени — обычно один раз в два года. До начала процесса проверки их следует оставить в вертикальном положении при комнатной температуре не менее чем на 24 часа.

Температуру замерзания можно проверить, наполнив сосуд Дьюара измельченным льдом из дистиллированной воды и доливая дистиллированную воду. В пространстве между кусочками льда и между льдом и дном сосуда не должно быть воздуха. Уровень воды должен быть на 2 см ниже поверхности льда. Для определения точки замерзания большинства термометров можно использовать обычный термос. Термометры следует размещать таким образом, чтобы возможно меньшая часть столбика ртути или спирта возвышалась над льдом. Перед снятием показаний термометра следует сделать по меньшей мере 15-минутную паузу для того, чтобы дать возможность термометру принять температуру тающего льда. Каждый термометр следует двигать взад и вперед в этой смеси и немедленно снимать показания с точностью до десятой доли деления шкалы. Последующие показания следует снимать через 5-минутные интервалы времени, а затем рассчитать их среднее значение.

Остальные точки в диапазоне температур можно определить по переносному эталону или инспекционному термометру. Следует сделать сравнение эталонного термометра и одного или нескольких проверяемых термометров посредством погружения их в глубокий сосуд с водой. Как правило, лучше работать в помещении, особенно в солнечную погоду, а наилучшие результаты получаются в том случае, если температура воды соответствует температуре окружающей среды или близка к ней.

Каждый термометр сравнивают с эталонным, а термометры одного типа можно сравнивать друг с другом. При каждом сравнении термометры следует размещать так, чтобы их резервуары были по возможности ближе друг к другу, двигать их в воде взад и вперед в течение 1 минуты, а затем снимать показания. Термометры следует располагать таким образом, чтобы можно было снимать показания, не изменяя глубины погружения, при этом резервуары термометров должны быть погружены в воду как можно глубже. Большинство метеорологических термометров калибруются в лабораторных условиях при полном погружении, однако корректировка за счет неполного погружения капиллярной трубки должна быть незначительной при условии, что разность температур воды и воздуха составляет не более 5 К. Часто при расположении резервуаров термометров на одинаковой глубине верхние отметки столбиков ртути (или другой жидкости) в эталонном и проверяемом термометрах находятся довольно далеко друг от друга. В таких случаях следует проявить особую тщательность во избежание ошибок параллакса.

Сравнения следует сделать по меньшей мере три раза для каждой пары термометров. Для каждой серии сравнений среднее значение разности между показаниями термометров не должно превышать определенные погрешности, указанные в настоящем томе, глава 1, приложение 1.А.

Почвенные термометры можно проверять таким же способом, но их следует оставлять в воде не менее 30 минут с тем, чтобы покрытые воском резервуары термометров приняли

температуру воды. Большая постоянная времени почвенного термометра затрудняет проведение качественной проверки, если невозможно поддерживать постоянную температуру воды. Если проверка проводится тщательно в воде, температура которой изменяется не более чем на 1 К в течение 30 минут, то разность между поверяемым термометром и скорректированным показанием эталонного термометра не должна превышать 0,25 К.

2.3.6 Поправки

При изготовлении термометры, идентифицируемые по серийному номеру, должны быть снабжены либо сертификатом с указанием даты изготовления, подтверждающим соответствие требованиям к погрешности измерений, или сертификатом поверки с указанием даты и поправок, которые следует применять к показаниям для получения требуемой точности.

Если погрешности в выбранных точках в диапазоне показаний термометров (например, 0 °C, 10 °C, 20 °C) не превышают $\pm 0,05$ К, то нет необходимости в поправках, и термометры могут использоваться в качестве стационарных термометров, устанавливаемых в естественно вентилируемых будках, а также в качестве максимальных, минимальных, почвенных термометров и термометров для измерения минимальной температуры в травостое. Если погрешности в выбранных точках составляют более 0,05 К, наблюдатель должен быть снабжен таблицей поправок к показаниям, а также четкими инструкциями о том, как эти поправки применять.

Сертификатами должны быть снабжены следующие термометры:

- a) для использования в вентилируемых психрометрах;
- b) для использования в качестве переносных эталонов сравнения;
- c) для использования в качестве эталонных термометров для калибровки в лабораторных условиях;
- d) для использования в специальных целях, для которых применение поправок обосновано.

Для психрометрических целей следует выбирать два идентичных термометра.

2.3.7 Обслуживание

2.3.7.1 Разрыв столбика жидкости

Наиболее часто встречающимся недостатком является разрыв столбика жидкости, особенно во время транспортировки. Это чаще случается со спиртовыми (минимальными) термометрами. Другими проблемами, характерными для этих термометров, являются адгезия спирта на стекле и образование капелек спирта за счет дистилляции в капилляре.

Разрыв столбика жидкости обычно можно ликвидировать, держа термометр резервуаром вниз и слегка постукивая им о пальцы руки или какой-либо предмет, эластичный и не слишком твердый. Постукивание необходимо продолжать в течение некоторого времени (в течение 5 минут, если это необходимо), а затем подвесить термометр, либо поставить его вертикально в подходящий контейнер резервуаром вниз по крайней мере на час, для того чтобы дать возможность спирту, прилипшему к стенке стекла, стечь вниз к основному столбику. Если подобный метод не приносит успеха, то более эффективным методом является охлаждение резервуара в холодной смеси льда и соли при сохранении верхней части капилляра в тепле. Тогда жидкость будет медленно возвращаться к основной части столбика. Кроме того, резервуар термометра можно поместить в сосуд с теплой водой и, держа термометр вертикально, одновременно постукивать или

стряхивать воду с капилляра до тех пор, пока верхняя часть столбика спирта не достигнет расширенной верхней части капилляра. Этим методом следует пользоваться с особой осторожностью, так как существует риск растрескивания термометра, если спирт попадает в расширение капилляра.

2.3.7.2 **Нечеткость шкалы**

Другим недостатком жидкостных стеклянных термометров, не снабженных футлярами, является то, что со временем шкала становится нечеткой. Это можно исправить на станции, потеряв шкалу темным литографическим либо черным графитовым карандашом.

2.3.8 **Безопасность**

Ртуть, которая чаще всего использовалась в жидкостных стеклянных термометрах, является ядовитой и может вызвать отравление при проглатывании или вдыхании ее паров. Если термометр разбит, а капельки ртути не удалены, то существует опасность для здоровья, особенно в закрытых помещениях. Более подробная информация о мерах предосторожности при использовании ртути приводится в настоящем томе, глава 3, приложение 3.А. Существуют также ограничения при транспортировке ртутных стеклянных термометров самолетом или особые меры предосторожности, которые следует предпринять для предотвращения утечки ртути в случае поломки термометра. За консультацией следует обратиться в администрацию соответствующей инстанции или перевозчика.

2.4 **МЕХАНИЧЕСКИЕ ТЕРМОГРАФЫ**

2.4.1 **Общие положения**

Биметаллические термографы и термографы с трубкой Бурдона являются приборами, которые все еще широко применяются вследствие их относительной дешевизны, надежности и портативности. Однако их нелегко приспособить для дистанционной или электронной регистрации. В состав таких термографов входит вращающийся ленточный механизм, обычный для группы классических самописцев. В целом термографы должны работать в диапазоне примерно 60 К или даже 80 К, если они используются в условиях континентального климата. Требуется такая цена деления шкалы, чтобы можно было без труда производить считывание значений температуры с погрешностью не более 0,2 К на ленте среднего размера. Для выполнения этого требования следует предусмотреть возможность переустановки нулевой отметки прибора в зависимости от сезона. Максимальная погрешность термографа не должна превышать 1 К.

2.4.1.1 **Биметаллический термограф**

В биметаллическом термографе движение записывающего пера регулируется за счет изменения кривизны биметаллической пластинки или пружины, один конец которой жестко скреплен с кронштейном, укрепленным на корпусе. Должно быть предусмотрено регулировочное устройство для того, чтобы при необходимости можно было менять нулевую отметку прибора. Кроме того, в приборе должно быть предусмотрено изменение цены деления шкалы за счет регулировки длины рычага, передающего движение биметаллической пластинки перу; регулировку должен производить персонал, имеющий на это разрешение. Биметаллический элемент нужно соответствующим образом предохранить от коррозии; это лучше всего сделать за счет покрытия из меди, никеля либо хрома, хотя для некоторых типов климата достаточным, вероятно, является покрытие лаком. Прибор имеет постоянную времени около 25 с при скорости ветра $5 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$.

2.4.1.2 **Термограф с трубкой Бурдона**

По своему устройству прибор в целом похож на прибор биметаллического типа, но температурный датчик имеет форму изогнутой металлической трубки плоского эллиптического сечения, наполненной спиртом. Трубка Бурдона менее чувствительна, чем биметаллический элемент, и обычно требует наличия рычажного механизма усиления для того, чтобы получить необходимую цену деления шкалы. Прибор имеет типичную постоянную времени, равную примерно 6 с при скорости ветра $5 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$.

2.4.2 **Порядок проведения измерений**

Для улучшения разрешающей способности термографы в разное время года часто настраиваются на один или два разных диапазона с применением соответствующих лент. Точная дата перехода с одного комплекта лент на другой будет изменяться в зависимости от условий местонахождения. Однако при осуществлении этого перехода прибор требуется отрегулировать. Регулировка должна производиться либо в метеорологической будке в облачный ветреный день при практически постоянной температуре, либо в помещении с постоянной температурой. Регулировка производится посредством отпускания винта, с помощью которого рычаг пера крепится к его стержню, и установления рычага пера в правильное положение с последующим затягиванием винта. Прибор оставляют до повторной проверки и дальнейших регулировок, которые могут потребоваться.

2.4.3 **Размещение и установка**

Эти приборы должны устанавливаться в больших психрометрических будках (например, в метеорологической будке Стивенсона с внутренней измерительной камерой размером $450 \times 700 \times 400 \text{ мм}$).

2.4.4 **Источники погрешностей**

Трение является основным источником погрешностей механизма термографа. Одной из причин трения является плохая центровка спирали по отношению к стержню. Если не установить спираль точно, то она действует как мощная пружина, а при жестком закреплении она прижимает основной стержень к одной стороне подшипников. В современных приборах это не должно вызывать серьезных проблем. Трение между пером и лентой можно свести к минимуму посредством соответствующей регулировки подвески рабочего механизма.

2.4.5 **Сравнение и калибровка**

2.4.5.1 **Калибровка в лабораторных условиях**

Существует два основных метода лабораторной калибровки биметаллических термографов. Их можно проверять, установив неподвижно в соответствующее положение и поместив биметаллический элемент в водяную ванну. Можно также поместить термограф в поверочную камеру промышленного типа, снабженную механизмом контроля температуры воздуха, вентилятором и эталонным термометром.

Сравнения следует сделать при двух значениях температуры и, исходя из этого, можно выявить изменения нулевой отметки на ленте. Регулировка шкалы должна проводиться персоналом, имеющим на это разрешение, и только с учетом положений инструкции изготовителя прибора.

2.4.5.2 **Сравнение в условиях эксплуатации**

Постоянная времени прибора может быть равна лишь половине постоянной времени обычного ртутного термометра, поэтому показания сухого термометра и термографа в определенное время не будут совпадать, даже если прибор работает прекрасно. Лучше всего произвести проверку показаний прибора в тот день и в то время, когда температура почти постоянна (обычно облачный, ветреный день); можно также сравнить минимальные показания записей термографа с показаниями минимального термометра, установленного в той же будке. Затем можно произвести любую необходимую регулировку посредством установочного винта.

2.4.6 **Поправки**

Термографы обычно не снабжаются сертификатом поправок. Если в результате проверок на станции выявляются погрешности, превышающие допустимые, и они не могут быть устранены на месте, прибор должен быть возвращен в соответствующую поверочную лабораторию для ремонта и повторной проверки.

2.4.7 **Обслуживание**

Текущее обслуживание включает в себя проверку внешнего состояния, свободного хода подшипников, угла наклона записывающего рычага, установки пера и угла между рычагами усиления и записи, а также проверку настройки часового механизма, вращающего барабан с лентой. Такие проверки должны проводиться в соответствии с рекомендациями изготовителя. Со спиралью следует обращаться осторожно во избежание механического повреждения и содержать ее в чистоте. Подшипники оси должны содержаться в чистоте, умеренно смазываться часовым маслом через определенные промежутки времени. Прибор очень простой в механическом отношении, и, поскольку предусмотренные предосторожности направлены на сведение к минимуму трения и на предохранение от коррозии, он должен хорошо работать.

2.5 **РАДИАЦИОННЫЕ ЗАЩИТЫ**

Радиационная защита или экран должны быть спроектированы таким образом, чтобы обеспечить огороженное пространство, имеющее равномерную температуру, которая являлась бы такой же, как температура окружающего воздуха. Защита должна полностью окружать термометры и исключать возможность воздействия на них теплового излучения, осадков и других явлений, которые могут повлиять на измерение.

Экраны с принудительной вентиляцией, при использовании которых воздух направляется на элемент термометра с помощью вентилятора, могут помочь уменьшить погрешности измерения в тех случаях, когда микроклимат внутри огороженного пространства отклоняется от микроклимата окружающей воздушной массы. Такое отклонение наиболее велико при очень низкой скорости естественного ветра ($< 1 \text{ м с}^{-1}$). При использовании принудительной вентиляции следует принять меры, чтобы предотвратить осаждение аэрозолей и капель дождя на датчик температуры, под воздействием которых температура, показываемая датчиком, понижается до температуры, показываемой смоченным термометром. Средства радиационной защиты с принудительной вентиляцией должны иметь четкий индикатор состояния фактического режима работы вентилятора непосредственно на экране или на контролирующем устройстве либо на регистраторе данных, чтобы предоставить обслуживающему техническому персоналу проверять правильность работы вентилятора с помощью визуального контроля. Кроме того, сведения о состоянии режима работы вентилятора и предпочтительно о частоте его вращения должны содержаться в выходных данных для целей автоматического контроля.

В качестве материала для защиты подходит неокисляющийся металл с тщательно отполированной поверхностью, так как он обладает высокой отражательной способностью и низкой теплоемкостью. Тем не менее, широко используются пластиковые материалы с низкой теплопроводностью в связи с несложными требованиями к их техническому обслуживанию. Если система основана на принципе естественной вентиляции, то в обязательном порядке следует также использовать материал с низкой теплопроводностью.

Эффективность работы защиты (реагирование на воздействие и микроклиматические факторы, ведущие к нежелательным погрешностям измерения) зависит, главным образом, от ее конструкции, в которой необходимо обеспечить как защиту от радиации, так и достаточный уровень вентиляции. С тех пор, как начали производить метеорологические измерения температуры, были предложены самые разные типы конструкций защиты. После того, как температуру стали измерять с помощью АМС, разнообразие конструкций значительно возросло (см. WMO, 1998a). Из-за различий в специфике применений, степени автоматизации и климатических условиях, трудно рекомендовать один конкретный тип конструкции, подходящий для проведения измерений по всему миру. Хороший обзор конструкций и эффективности их функционирования приведен в публикации WMO (1972). Результаты взаимных сравнений защит термометров описаны в публикациях Andersson and Mattison (1991), Sparks (2001), WMO (1998b; 1998c; 1998d; 2000a; 2000b; 2002b; 2002c; 2002d) и в публикации Zanghi (1987).

В соответствии с международным стандартом (ISO/DIS 17714) определяются наиболее соответствующие требованиям типы защит и описываются методы оценки и сравнения эффективности их функционирования (ISO, 2007).

Поскольку радиационная защита может обеспечить значительный вклад в общую оценку погрешности измерений температуры, необходимо оценить и рассчитать влияние различных метеорологических ситуаций (например, восход солнца после ясной ночи, морозные узоры или снег внутри и снаружи, конденсат внутри и снаружи, влияние жидких осадков).

2.5.1 Жалюзийные будки

В большинстве различных типов жалюзийной будки используется принцип естественной вентиляции. Стены такой будки должны иметь двойные жалюзи, а пол должен быть сделан из досок, идущих уступами. Можно найти и другие типы конструкций, отвечающих вышеуказанным требованиям. Крыша должна быть двухслойной с вентилируемым воздушным пространством между слоями. В условиях холодного климата из-за высокой отражательной способности снега (до 88 %) будка должна иметь двойной пол. В то же время пол должен легко опускаться либо наклоняться с тем, чтобы можно было удалить снег, попавший внутрь во время метели.

Размеры и конструкция будки должны быть такими, чтобы обеспечить как можно более низкую теплоемкость, а также достаточное пространство между приборами и стенами. Последнее требование исключает всякую вероятность непосредственного контакта чувствительных элементов термометра со стенами и приобретает особую важность в тропиках, где солнечная радиация может нагреть стены до такой степени, что вызовет заметный температурный градиент в будке. Следует избегать также непосредственного контакта между чувствительными элементами и креплением термометра. Будка должна быть выкрашена внутри и снаружи белой негигроскопичной краской.

При двойных стенах воздух между ними служит для уменьшения количества тепла, которое в противном случае поступало бы за счет теплопроводности от внешней стены внутрь будки, особенно при значительной солнечной радиации. При ветре воздух между стенами непрерывно меняется и поступление тепла от внешних стен внутрь будки еще сильнее уменьшается.

Свободная циркуляция воздуха в будке способствует тому, что температура внутренней стены меняется в соответствии с изменениями температуры окружающего воздуха. Таким образом, уменьшается влияние внутренней стены на температуру термометра. Кроме того, свободная циркуляция воздуха внутри будки способствует тому, что термометр быстрее реагирует на изменения температуры окружающего воздуха, чем в условиях только радиационного обмена. Однако воздух, циркулирующий в будке, определенное время контактирует с внешними стенами и поэтому его температура может отличаться от температуры воздуха, окружающего будку. Эти отличия становятся заметными, когда ветер слаб, а температура внешней стены значительно отличается от температуры окружающего воздуха. Таким образом, можно ожидать, что температура воздуха в будке днем при сильном солнечном сиянии и слабом ветре будет выше истинной температуры воздуха, а в ясную тихую ночь — несколько ниже, причем в экстремальных случаях погрешности могут достигать 2,5 и –0,5 К соответственно. Дополнительные погрешности могут быть вызваны охлаждением за счет испарения с мокрой поверхности будки после дождя. Все эти факторы оказывают влияние и на показания других приборов, находящихся в будке, таких, как гигрометры, испарители и т. п.

Погрешности, возникающие вследствие изменений естественной вентиляции, можно уменьшить, если установить в будке соответствующим образом спроектированную систему принудительной вентиляции, которая обеспечивает постоянную и определенную скорость вентилирования, по крайней мере при малых скоростях ветра. Следует обратить особое внимание на конструкцию таких систем с тем, чтобы тепло от вентилятора или другого электрического двигателя не влияло на температуру в будке.

В целом необходима лишь одна дверь при условии, что будка расположена таким образом, что солнце не светит на термометры, когда дверь открыта во время наблюдения. В тропиках необходимы две двери, используемые в различные периоды года. В полярных районах (где солнце светит под низким углом) также следует принять меры по защите внутренней части будки от прямых солнечных лучей; сделать это можно с помощью затенения или использования экрана, закрепленного таким образом, чтобы его можно было поворачивать под соответствующим углом в то время, когда дверь открыта для снятия показаний.

Хотя большинство будок все еще изготавливается из дерева, некоторые последние модели, выполненные с применением пластиковых материалов, имеют более эффективную радиационную защиту благодаря усовершенствованию жалюзи, обеспечивающих более интенсивную циркуляцию воздуха. В любом случае будка и подставка должны быть сделаны из твердых материалов и неподвижно закреплены с таким расчетом, чтобы свести к минимуму погрешности максимальных и минимальных термометров, вызываемые ветровой вибрацией. В тех местах, где нельзя полностью избавиться от ветровой вибрации, рекомендуется использовать кронштейны гибкого крепления. Земля под будкой должна иметь травяное покрытие, а в тех местах, где трава не растет, — естественное покрытие, характерное для данного района.

Будка должна содержаться в чистоте и регулярно перекрашиваться; во многих районах достаточно проводить покраску один раз в два года, но в районах, подверженных атмосферному загрязнению, необходимо делать это, по крайней мере, один раз в год.

2.5.2 Другие искусственно вентилируемые средства защиты

Основной альтернативой установкой термометра в жалюзийной будке с естественной или искусственной вентиляцией является защита резервуара термометра от прямой солнечной радиации двумя концентрическими цилиндрами и создание потока воздуха, проходящего (со скоростью между 2,5 и 10 м·с⁻¹) между ними и обтекающего резервуар термометра. Такой тип установки обычен для аспирационных психрометров (см. настоящий том, глава 4). В принципе, защита должна быть изготовлена из термоизоляционного материала, хотя в психрометре Асмана щитки сделаны из чисто отполированного металла для того, чтобы уменьшить количество поглощаемой ими солнечной радиации. При измерениях внутренний щиток поддерживается в соприкосновении с потоком воздуха,

перемещающимся вокруг него с таким расчетом, чтобы его температура и, следовательно, температура термометра могли являться максимальным приближением к температуре воздуха. Подобные щитки обычно крепятся таким образом, чтобы их оси имели вертикальное положение. Количество излучения, поступающего через основание таких щитков от земли, невелико и может быть уменьшено за счет значительного удлинения щитков ниже резервуара термометра. Когда искусственная вентиляция обеспечивается с помощью электрического вентилятора, следует принять меры для того, чтобы предотвратить поступление тепла от мотора и вентилятора к термометрам.

В конструкции эталонного психрометра ВМО особое значение придается влиянию радиации и использованию искусственной вентиляции, а также экранированию с целью поддержания элемента термометра в равновесии с истинной температурой воздуха (см. часть I, глава 4).

2.6 ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПРОСЛЕЖИВАЕМОСТИ И КАЛИБРОВКА

Национальная метеорологическая или другая аккредитованная поверочная лаборатория должны иметь в качестве рабочего эталона высококачественный ПТС, соответствующий национальному и международному эталонам (WMO, 2010). Высококачественный ПТС может представлять собой ПТС или ЭПТС. ЭПТС должны прослеживаться до национального и международного уровня путем внешней калибровки по выбранным реперным точкам (см. таблицу в приложении). Поскольку ЭПТС представляют собой современные термометры с самой низкой погрешностью, для проведения лабораторных процедур необходимо дополнительное лабораторное оборудование (измерительный мост, эталонные резисторы и т. д.) и методы, обеспечивающие наилучшее использование возможностей прибора. Работоспособность ЭПТС можно периодически проверять в камере тройной точки воды. Тройная точка воды может воспроизводиться в камере тройной точки воды с погрешностью $1 \cdot 10^{-4}$ К. ПТС должны прослеживаться до национального и международного уровня путем внешней сравнительной калибровки в интересующем метеорологическом диапазоне. ЭПТС или ПТС используются в лабораториях калибровки для распространения значений на рабочие эталоны и/или калибруемые приборы, обычно с помощью сравнительной калибровки. Все лабораторное оборудование, используемое в процессе калибровки, вносит вклад в погрешность измерений и должно прослеживаться до СИ в соответствии со стратегией прослеживаемости (см. настоящий том, глава 1, приложение 1.B).

Сравнительная калибровка обычно выполняется путем измерения эталонного стандарта и сопротивления или напряжения калибруемого прибора при воздействии стабильной температуры во всем интересующем температурном диапазоне. По сути, требуется четыре типа инструментов:

- контрольный эталон;
- система сбора данных для контрольного эталона;
- система сбора данных для калибруемого прибора;
- источник стабильной температуры.

Перед использованием контрольный эталон следует проверить в точке замерзания или тройной точке воды, чтобы убедиться, что с момента предыдущей калибровки прибора сопротивление существенно не изменилось. Внешняя калибровка контрольного эталона должна проводиться с интервалами, зависящими от частоты использования и температурного диапазона. Необходимо применять внутренние процедуры обеспечения качества (избыточные проверки стабильности).

При калибровке термометра сопротивления по контрольному ПТС или ЭПТС технические требования к считывающим устройствам будут одинаковы как для калибруемых приборов,

так и для контрольного термометра. При наличии системы мультиплексирования одно устройство считывания обычно может использоваться для обеих систем. Это возможно в том случае, если устройство считывания предназначено для калибровки температуры (а не только для измерения температуры) и имеет переменные настройки (ток, время и так далее). Однако если считывающее устройство не предназначено для калибровки температуры и/или отсутствует система переключения, то потребуются два считывающих устройства или более. Наилучшие результаты будут получены при использовании считывающих устройств, специально предназначенных для калибровки термометров. В отношении ПТС и ЭПТС необходимо учитывать два важных момента:

- убедитесь, что считывающее устройство имеет диапазон сопротивления, соответствующий эталонному термометру и калибруемым приборам, для которых оно предназначено. Многие современные устройства для снятия показаний термометров разработаны таким образом, чтобы охватывать этот интервал в едином диапазоне;
- убедитесь, что в считывающем устройстве используется надлежащий ток источника. Неправильный ток источника приведет к чрезмерному саморазогреву и неправильной калибровке.

Во время калибровки термометры помещаются в теплоноситель в источнике температуры. Теплоносителем может служить перемешиваемая жидкость, металлический блок или воздух. Теплоноситель поддерживает постоянную и равномерную температурную среду, что позволяет сравнивать показания тестируемого термометра с показаниями более точного термометра. Калибровочную ванну или камеру нельзя считать полностью стабильной во времени и однородной по всему объему, особенно когда калибровка температуры путем сравнения проводится при самых малых погрешностях. Это обычно представляет собой значительный вклад в общую погрешность процедуры калибровки. Для уменьшения этого вклада в погрешность в калибровочных ваннах можно использовать выравнивающие блоки. Размер такого блока определяется размером ванны.

Погрешность измерения при калибровке термометра зависит от используемого метода калибровки, вклада в погрешность эталонов, характеристик используемого измерительного оборудования и характеристик калибруемого прибора.

В целом, интервалы между калибровками зависят от условий эксплуатации. Поскольку различные устройства для измерения температуры могут использоваться в самых разных условиях, не всегда можно установить точные интервалы калибровки. В таких случаях необходимо иметь данные (например, результаты регулярных проверок «между калибровками»), чтобы продемонстрировать, что интервалы калибровки выбраны таким образом, чтобы калибровка проводилась до значительного изменения калибровочных поправок.

ПРИЛОЖЕНИЕ. ОПРЕДЕЛЕНИЕ РЕПЕРНЫХ ТОЧЕК МЕЖДУНАРОДНОЙ ТЕМПЕРАТУРНОЙ ШКАЛЫ, ПРИНЯТОЙ В 1990 ГОДУ

Реперные точки МТШ-90, представляющие интерес для метеорологических измерений, приведены в таблице ниже.

Стандартный метод интерполяции реперных точек заключается в использовании формул, применяемых для установления связи между показаниями эталонных приборов и значений МТШ-90 (BIPM, 1990). Эталонным прибором, применяемым в диапазоне от $-259,34\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $961,78\text{ }^{\circ}\text{C}$, является ПТС.

Альтернативным практическим методом аппроксимации МТШ-90 при калибровке ПТС (определение R_0 , A , B и C , см. уравнение ниже) является получение данных о зависимости сопротивление-температура путем сравнения с градуированным ЭПТС при различных температурах в диапазоне, представляющем интерес, а потом выбор полинома для данных с помощью метода наименьших квадратов.

Связь между сопротивлением ПТС, проходящего калибровку, и температурой, измеренной с использованием эталонного термометра, описывается с помощью уравнения интерполяции. Уравнение Каллендара — Ван Дьюзена в общем и целом признается в качестве уравнения интерполяции для промышленных ПТС (определено в МЭК 60751 (2008)), а не для ЭПТС:

$$R = R_0 \left(1 + At + Bt^2 + C(t - 100)t^3 \right)$$

где R — сопротивление платиновой проволоки при температуре t , R_0 — ее сопротивление при $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ (температура таяния льда), а A , B и C ($C=0$ для $t > 0\text{ }^{\circ}\text{C}$) — константы, которые получают, используя метод наименьших квадратов на основании данных, полученных во время калибровки.

Определение реперных точек по МТШ-90 в метеорологическом диапазоне

Состояние равновесия	Присвоенное значение МТШ	
	K	$^{\circ}\text{C}$
Равновесие между твердой, жидкой и парообразной фазами аргона (тройная точка аргона)	83,805 8	$-189,344\ 2$
Равновесие между твердой, жидкой и парообразной фазами ртути (тройная точка ртути)	234,315 6	$-38,834\ 4$
Равновесие между твердой, жидкой и парообразной фазами воды (тройная точка воды)	273,160 0	0,01
Равновесие между твердой и жидкой фазами галлия (точка замерзания галлия)	302,914 6	29,764 6
Равновесие между твердой и жидкой фазами индия (точка замерзания индия)	429,748 5	156,598 5

СПРАВОЧНАЯ И ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА

- Andersson, T. and I. Mattison, 1991: *A Field Test of Thermometer Screens*. SMHI Report No. RMK 62, Norrköping.
- ASTM, 1993: *ASTM Manual on The Use of Thermocouples in Temperature Measurement*. Philadelphia, ASTM.
- Bentley, R.E. (Ed.), 1998: *Temperature and Humidity Measurement*. Singapore, Springer-Verlag.
- Bugbee, B., O. Monje and B. Tanner, 1996: Quantifying energy and mass transfer in crop canopies. *Advances in Space Research*, 18:149–156.
- Bureau International des Poids et Mesures, 1989: *Procès-Verbaux du Comité International des Poids et Mesures*, 78th meeting, 1989, Paris (available from <http://www.bipm.org/utls/common/pdf/its-90/ITS-90.pdf>).
- Bureau International des Poids et Mesures/Comité Consultatif de Thermométrie, 1990: The International Temperature Scale of 1990 (ITS-90) (H. Preston-Thomas). *Metrologia*, 27:3–10 (amended version) (available from http://www.bipm.org/utls/common/pdf/its-90/ITS-90_metrologia.pdf).
- Çengal, Y.A. and A.J. Ghajar, 2014: *Heat and Mass Transfer: Fundamentals and Application*. Fifth edition. New York, McGraw-Hill Education.
- Diamond, H. J., T.R. Karl, M.A. Palecki, C.B. Baker, J.E. Bell, R.D. Leeper, D.R. Easterling, J.H. Lawrimore, T.P. Meyers, M.R. Helfert, G. Goodge and P.W. Thorne, 2013: U.S. Climate Reference Network after one decade of operations: status and assessment. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 94:489–498, doi: 10.1175/BAMS-D-12-00170.1.
- Erell, E., V. Leal and E. Maldonado, 2005: Measurement of air temperature in the presence of a large radiant flux: an assessment of passively ventilated thermometer screens. *Boundary Layer Meteorology*, 114:205–231.
- Harrison, R.G., 2010: Natural ventilation effects on temperatures within Stevenson screens. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 136(646)A:253–259, DOI: 10.1002/qj.537.
- , 2015: *Meteorological Measurements and Instrumentation*. Chichester, Wiley.
- Harrison R.G. and M.A. Pedder, 2001: Fine wire thermometer for air measurement. *Review of Scientific Instruments*, 72(2):1539–1541.
- Harrison, R.G. and G.W Rogers, 2006: Fine wire thermometer amplifier for atmospheric measurements. *Review of Scientific Instruments*, 77(11):116112.
- Harvey, A.H., M.O. McLinden and W.L. Tew, 2013: Thermodynamic analysis and experimental study of the effect of atmospheric pressure on the ice point. *AIP Conference Proceedings*. 1552:221, doi: 10.1063/1.4819543.
- Her Majesty's Stationery Office/Meteorological Office, 1980: *Handbook of Meteorological Instruments*, Volume 2: Measurement of temperature. London.
- Incropera, F.P. and D.P. de Witt, 2011: *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. Chichester, Wiley.
- International Electrotechnical Commission, 2008: *Industrial Platinum Resistance Thermometers and Platinum Temperature Sensors*, IEC 60751:2008. Geneva.
- International Organization for Standardization, 2007: *Meteorology – Air Temperature Measurements – Test Methods for Comparing the Performance of Thermometer Shields/Screens and Defining Important Characteristics*, ISO/DIS 17714:2007. Geneva.
- Jones, E.B., 1992: *Jones' Instrument Technology*. Volume 2: Measurement of temperature and chemical composition, Butterworths-Heinemann, Oxford.
- Middleton, W.E.K. and A.F. Spilhaus, 1960: *Meteorological Instruments*. University of Toronto Press.
- Ney, E.P., R.W. Maas and W.F. Huch, 1960: The measurement of atmospheric temperature. *Journal of Meteorology*, 18:60–80.
- Nicholas, J.V. and D.R. White, 1993: *Traceable Temperatures*. Second edition. Chichester, Wiley.
- Quinn, T.J., 1990: *Temperature*. Second edition. San Diego, Academic Press.
- Richiardone, R., M. Manfrin, S. Ferrarese, C. Francone, V. Fericola, R. M. Gaviglio and L. Mortarini, 2012: Influence of the Sonic Anemometer Calibration on Turbulent Heat-Flux Measurements. *Boundary-Layer Meteorology*, 142(3):425–442.
- Schotanus, P., F.T.M. Nieuwstadt and H.A.R. e Bruin, 1983: Temperature measurement with a sonic anemometer and its application to heat and moisture fluxes. *Boundary-Layer Meteorol.* 26:81–93.
- Sparks, W.R., 1970: Current concepts of temperature measurement applicable to synoptic networks. *Meteorological Monographs*, 11(33):247–251.
- , 2001: Field trial of Metspec screens. *Technical Report TR19*, Met Office/OD, Wokingham, United Kingdom of Great Britain and Northern Ireland.

- Underwood, R., M. de Podesta, G. Sutton, L. Stanger, R. Rusby, P. Harris, P. Morantz and G. Machin, 2017: Further estimates of $(T - T_{90})$ close to the triple point of water. *International Journal of Thermophysics*, 38:44.
- Underwood, R., T. Gardiner, A. Finlayson, S. Bell and M. de Podesta, 2017: An improved non-contact thermometer and hygrometer with rapid response. *Metrologia*, 54(1):S9.
- Underwood, R., T. Gardiner, A. Finlayson, J. Few, J. Wilkinson, S. Bell, J. Merrison, J.J. Iverson and M. de Podesta, 2015: A combined non-contact acoustic thermometer and infrared hygrometer for atmospheric measurements. *Meteorological Applications*, 22:830–835.
- White, D.R., 2015: Temperature errors in linearizing resistance networks for thermistors. *International Journal of Thermophysics*, 36:3404–3420, DOI 10.1007/s10765-015-1968-2.
- , 2017: Interpolation errors in thermistor calibration equations. *International Journal of Thermophysics*, 38(4):59, DOI 10.1007/s10765-017-2194-x.
- World Meteorological Organization, 1972: *The Effect of Thermometer Screen Design on the Observed Temperature* (W.R. Sparks). (WMO-No. 315). Geneva.
- , 1992: *Measurement of Temperature and Humidity: Specification, Construction, Properties and Use of the WMO Reference Psychrometer* (R.G. Wylie and T. Lalas). Technical Note No. 194 (WMO-No. 759). Geneva.
- , 1998a: *Recent Changes in Thermometer Screen Design and their Impact* (A. Barnett, D.B. Hatton and D.W. Jones). Instruments and Observing Methods Report No. 66 (WMO/TD-No. 871). Geneva.
- , 1998b: An investigation of temperature screens and their impact on temperature measurements (J. Warne). Paper presented at the WMO Technical Conference on Meteorological and Environmental Instruments and Methods of Observation (TECO-98). Instruments and Observing Methods Report No. 70 (WMO/TD-No. 877). Geneva.
- , 1998c: A thermometer screen intercomparison (J.P. van der Meulen). Paper presented at the WMO Technical Conference on Meteorological and Environmental Instruments and Methods of Observation (TECO-98). Instruments and Observing Methods Report No. 70 (WMO/TD-No. 877). Geneva.
- , 1998d: Comparison of meteorological screens for temperature measurement (G. Lefebvre). Paper presented at the WMO Technical Conference on Meteorological and Environmental Instruments and Methods of Observation (TECO-98). Instruments and Observing Methods Report No. 70 (WMO/TD-No. 877). Geneva.
- , 2000a: A comparison of air temperature radiation screens by field experiments and computational fluid dynamics (CFD) simulations (A. Spetalen, C. Lofseik and P. Ø. Nordli). Paper presented at the WMO Technical Conference on Meteorological and Environmental Instruments and Methods of Observation (TECO-2000). Instruments and Observing Methods Report No. 74 (WMO/TD-No. 1028). Geneva.
- , 2000b: Temperature measurements: Some considerations for the intercomparison of radiation screens (J.P. van der Meulen). Paper presented at the WMO Technical Conference on Meteorological and Environmental Instruments and Methods of Observation (TECO-2000). Instruments and Observing Methods Report No. 74 (WMO/TD-No. 1028). Geneva.
- , 2002a: Measurement of temperature with wind sensors during severe winter conditions (M. Musa, S. Suter, R. Hyvönen, M. Leroy, J. Rast and B. Tammelin). Paper presented at the WMO Technical Conference on Meteorological and Environmental Instruments and Methods of Observation (TECO-2002). Instruments and Observing Methods Report No. 75 (WMO/TD-No. 1123). Geneva.
- , 2002b: Norwegian national thermometer screen intercomparison (M.H. Larre and K. Hegg). Paper presented at the WMO Technical Conference on Meteorological and Environmental Instruments and Methods of Observation (TECO-2002). Instruments and Observing Methods Report No. 75 (WMO/TD-No. 1123). Geneva.
- , 2002c: Results of an intercomparison of wooden and plastic thermometer screens (D.B. Hatton). Paper presented at the WMO Technical Conference on Meteorological and Environmental Instruments and Methods of Observation (TECO-2002). Instruments and Observing Methods Report No. 75 (WMO/TD-No. 1123). Geneva.
- , 2002d: Temperature and humidity measurements during icing conditions (M. Leroy, B. Tammelin, R. Hyvönen, J. Rast and M. Musa). Paper presented at the WMO Technical Conference on Meteorological and Environmental Instruments and Methods of Observation (TECO-2002). Instruments and Observing Methods Report No. 75 (WMO/TD-No. 1123). Geneva.
- , 2010: *Guidance on Instrumentation for Calibration Laboratories, Including Regional Instrument Centres* (D. Groselj) (WMO/TD-No. 1543). Instruments and Observing Methods Report No. 101. Geneva.

- , 2011: *WMO Field Intercomparison of Thermometer Screens/Shields and Humidity Measuring Instruments* (M. Lacombe, D. Bousri, M. Leroy and M. Mezred). Instruments and Observing Methods Report No. 106 (WMO/TD-No. 1579). Geneva.
- Zanghi, F., 1987: *Comparaison des Abris Météorologiques*. Technical Memorandum No. 11, Météo-France/SETIM, Trappes.
-