

СОДЕРЖАНИЕ

	<i>Стр.</i>
ГЛАВА 2. ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ.	70
2.1 Общие сведения	70
2.1.1 Определение	70
2.1.2 Единицы измерения и шкалы.	70
2.1.3 Метеорологические требования.	71
2.1.3.1 Общие сведения	71
2.1.3.2 Требования к точности.	71
2.1.3.3 Инерционность термометров.	72
2.1.3.4 Регистрация условий, в которых производятся измерения	72
2.1.4 Методы измерения	72
2.1.4.1 Размещение и установка термометра	73
2.1.4.2 Эталонные приборы для измерения температуры	74
2.2 Жидкостные стеклянные термометры	74
2.2.1 Общие положения	74
2.2.1.1 Обычные (станционные) термометры	75
2.2.1.2 Максимальные термометры	76
2.2.1.3 Минимальные термометры.	76
2.2.1.4 Почвенные термометры.	76
2.2.2 Порядок проведения измерений	77
2.2.2.1 Снятие показаний обычных термометров	77
2.2.2.2 Измерение минимальной температуры воздуха в травостое	77
2.2.2.3 Измерение температуры почвы	78
2.2.3 Размещение и установка термометров	78
2.2.4 Источники погрешностей жидкостных стеклянных термометров.	78
2.2.4.1 Погрешности упругости.	79
2.2.4.2 Погрешности, вызываемые капиллярной трубкой термометра	79
2.2.4.3 Ошибки параллакса и грубые ошибки при снятии показаний	79
2.2.4.4 Погрешности, обусловленные различным расширением	80
2.2.4.5 Погрешности спиртовых термометров.	80
2.2.5 Сравнение и калибровка в лабораторных условиях и в условиях эксплуатации	80
2.2.5.1 Калибровка в лабораторных условиях	80
2.2.5.2 Проверка и калибровка в условиях эксплуатации	81
2.2.6 Поправки.	82
2.2.7 Обслуживание	82
2.2.7.1 Разрыв столбика жидкости	82
2.2.7.2 Нечеткость шкалы	83
2.2.8 Безопасность	83
2.3 Механические термографы	83
2.3.1 Общие положения	83
2.3.1.1 Биметаллический термограф	83
2.3.1.2 Термограф с трубкой Бурдона	84
2.3.2 Порядок проведения измерений	84
2.3.3 Размещение и установка	84
2.3.4 Источники погрешностей	84
2.3.5 Сравнение и калибровка.	84
2.3.5.1 Калибровка в лабораторных условиях	84
2.3.5.2 Сравнение в условиях эксплуатации.	85
2.3.6 Поправки.	85
2.3.7 Обслуживание	85
2.4 Электрические термометры	85
2.4.1 Общие положения	85
2.4.1.1 Электрические термометры сопротивления	85
2.4.1.2 Полупроводниковые термометры.	86
2.4.1.3 Термопары	87
2.4.2 Порядок проведения измерений	88
2.4.2.1 Электрические термометры сопротивления.	88
2.4.2.2 Термопары	88

	<i>Стр.</i>
2.4.3	Размещение и установка 89
2.4.4	Источники погрешностей 89
2.4.4.1	Электрические термометры сопротивления 89
2.4.4.2	Термопары 90
2.4.5	Сравнение и калибровка 91
2.4.5.1	Электрические термометры сопротивления 91
2.4.5.2	Термопары 91
2.4.6	Поправки 91
2.4.7	Обслуживание 91
2.5	Радиационные защиты 92
2.5.1	Жалюзийные будки 92
2.5.2	Другие искусственно вентилируемые средства защиты 94
ПРИЛОЖЕНИЕ. ОПРЕДЕЛЕНИЕ РЕПЕРНЫХ ТОЧЕК МЕЖДУНАРОДНОЙ ТЕМПЕРАТУРНОЙ ШКАЛЫ, ПРИНЯТОЙ В 1990 ГОДУ 95	
СПРАВОЧНАЯ И ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА 97	

ГЛАВА 2. ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ

2.1 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

2.1.1 Определение

В публикации WMO (1992) температура определяется как физическая величина, характеризующая усредненное хаотическое движение молекул в физическом теле. Температура определяется состоянием, при котором два тела, находящиеся в тепловом контакте, стремятся к равной температуре. Таким образом, температура отображает термодинамическое состояние тела, а ее величина определяется направлением суммарного потока тепла между двумя телами. В подобной системе считается, что тело, которое отдает тепло другому, имеет более высокую температуру. Однако, определить физическую величину температуры в зависимости от «состояния тела» не просто. Решение найдено с помощью, одобренной на международном уровне температурной шкалы, которая основана на общепринятых значениях точки замерзания и тройной точки вещества¹. В настоящее время такой шкалой является Международная температурная шкала, принятая в 1990 г. (МТШ-90)², в которой температура выражается как t_{90} (температура по шкале Цельсия) или как T_{90} (температура по шкале Кельвина). При измерении температур в метеорологическом диапазоне (от -95 °С до $+60$ °С) t_{90} определяется с помощью использования четко установленного техническими требованиями комплекта платиновых термометров сопротивления, градуированных по ряду определенных реперных точек и с использованием детализированных процедур интерполяции (BIPM, 1989, 1990).

Для метеорологических целей измеряют температуру ряда компонентов окружающей среды. Наиболее распространенной измеряемой переменной величиной является температура воздуха (на различных высотах). Также измеряется температура подстилающей поверхности, температура почвы, минимальная температура воздуха в травостое и температура 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

Термодинамическая температура (T), единицей измерения которой является кельвин (К) (также определяется как «температура по шкале Кельвина», представляет собой основную величину. Кельвин определяется как $1/273,16$ часть термодинамической температуры тройной точки воды. Для большинства метеорологических целей используется температура (t) в градусах по Цельсию (или «температура по шкале Цельсия») (на основании значения температуры точки льда, которая используется в качестве вторичной реперной точки в таблице 2.А.2 приложения), определяемая с помощью уравнения 2.1:

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

Один градус по шкале Цельсия (°С) равен одному кельвину (К). Необходимо отметить, что для температуры по шкале Кельвина символ, употребляемый для обозначения градусов (°), не используется.

¹ Авторитетным органом по вопросам, связанным с этой шкалой, является Международное бюро мер и весов (МБМВ), Севр (Париж); см. <http://www.bipm.org>. Консультативный комитет по термометрии (ККТ) МБМВ является исполнительным органом, отвечающим за разработку и осуществление МТШ.

² Практическую информацию по МТШ-90 можно найти на веб-сайте МТШ-90 по адресу: <http://www.its-90.com>.

Результаты измерений температуры по термодинамической шкале выражаются по отношению к абсолютному нулю (0 К) — температуре, при которой кинетическая энергия молекул любого вещества равна нулю. Начиная с 1990 г. повсеместно применяется Международная температурная шкала (МТШ-90) (см. приложение), которая основана на значениях температуры ряда воспроизводимых состояний равновесия (см. таблицу 2.А.1 приложения) и на эталонных приборах, градуированных по этим значениям температуры. МТШ была выбрана таким образом, чтобы температура, измеряемая по ней, в наибольшей степени приближалась к термодинамической температуре, причем любое различие между ними не выходило бы за существующие пределы погрешности измерений. Кроме определяемых реперных точек МТШ, имеются вторичные реперные точки (см. таблицу 2.А.2 приложения). Температуры, представляющие интерес с позиций метеорологии, получают посредством интерполяции реперных точек, используя стандартные формулы, приведенные в приложении.

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;
- e) верхних слоев атмосферы.

Результаты этих измерений, совместных или независимых, локальных или в глобальном масштабе, используются в численных моделях прогноза погоды, 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 Требования к точности

В части I, глава 1, настоящего Руководства подробно описаны требования к диапазону, разрешающей способности и погрешности измерений температуры. В практическом плане неэкономично выпускать термометры, которые удовлетворяют всем этим требованиям. Вместо этого используются более дешевые термометры, градуированные в соответствии с лабораторной стандартной методикой, причем в их показания вносятся поправки по мере необходимости. Число поправок может быть ограничено, но таким образом, чтобы погрешность измерений не превышала установленные пределы. Кроме того, следует выбирать такой рабочий диапазон термометра, который соответствует местному климатическому диапазону изменения температуры. В качестве примера в таблице приводится диапазон значений температуры, используемых при калибровке, и погрешности термометров с типичным диапазоном измерений.

Пример возможных характеристик термометра

<i>Тип термометра</i>	<i>Обычный</i>	<i>Максимальный</i>	<i>Минимальный</i>
Пределы шкалы (°C)	-30... 45	-30... 50	-40... 40
Диапазон градуировки (°C)	-30... 40	-25... 40	-30... 30
Наибольшая погрешность	< 0,2 К	0,2 К	0,3 К
Наибольшая разность между максимальной и минимальной поправкой в пределах диапазона	0,2 К	0,3 К	0,5 К
Максимальное изменение поправки в пределах любого интервала в 10 °C	0,1 К	0,1 К	0,1 К

Все приборы для измерения температуры должны быть снабжены либо свидетельством с данными о погрешности измерения или техническими характеристиками, либо свидетельством о поверке, содержащим поправки, которые следует применять для достижения необходимой точности. Первичные испытания и калибровка должны проводиться в аккредитованной поверочной лаборатории. В дальнейшем приборы для измерения температуры также должны поверяться через строго соблюдаемые интервалы времени; точные приборы, используемые для такой поверки, также должны быть откалиброваны по другому прибору или датчику.

2.1.3.3 Инерционность термометров

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 потребовалось бы 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 20 секунд. Постоянная времени термометра зависит от воздушного потока 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, строений и других объектов, 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. часть I, глава 1, приложение 1.C).

2.1.4 Методы измерения

Для того чтобы измерить температуру объекта, необходимо привести термометр к той же температуре, что и у объекта (т. е. в состояние термодинамического равновесия с ним), а затем измерить температуру самого термометра. Кроме того, температуру можно определить с помощью радиометра, не требующего условия теплового равновесия.

В качестве принципа действия термометра можно использовать любое свойство вещества, зависящее от температуры. Такими свойствами, наиболее широко используемыми в метеорологических термометрах, являются тепловое расширение и изменение электрического сопротивления при изменении температуры. Радиометры работают в инфракрасной части электромагнитного спектра и используются, кроме прочих применений, для измерений температуры со спутников. Специальные методы определения температуры воздуха с помощью ультразвуковых измерений, разработанные для определения скорости движения воздуха, также позволяют определить среднюю скорость движения молекул воздуха, и, как следствие, — температуру воздуха (WMO, 2002a).

Термометры, показывающие текущее значение температуры, часто называют обычными термометрами, а указывающие экстремальные значения температуры за некоторый промежуток времени — максимальными либо минимальными термометрами.

Описание конструкций приборов и лабораторных методов измерения температуры можно найти в различных сборниках, например, в публикациях Jones (1992) и Middleton and Spilhaus (1960). 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.

2.1.4.1 **Размещение и установка термометра**

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, причем различие зависит от интенсивности радиации, а также от соотношения между поглощенной радиацией и потерей тепла. У некоторых элементов термометра, таких, как очень тонкая проволока, используемая в термометре сопротивления без защиты, разница может быть очень небольшой или даже пренебрежимо малой. Однако, у обычных рабочих термометров при очень неблагоприятных условиях разница может достигать 25 К. Таким образом, для того чтобы термометр находился в условиях истинной температуры воздуха, необходимо защитить его от воздействия радиации; это достигается путем установки термометров в естественно вентилируемой будке либо — в радиационной защите, которая также служит средством крепления термометра. Защита также предохраняет термометр от осадков, обеспечивает свободную циркуляцию воздуха вокруг него и предотвращает случайные повреждения термометра. Попадание осадков на датчик может привести, в зависимости от потока воздуха в данном месте, к понижению температуры датчика, при этом он начинает вести себя как смоченный термометр. 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, необходимо принять меры, чтобы избежать непредсказуемых воздействий, вызванных осаждением влаги в сочетании с испарением по время выпадения осадков, мороси, тумана и других подобных явлений. В публикации Sparks (1970) приводится обзор методов измерения температуры, пригодных для оперативного применения.

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. Высота над уровнем земли указывается потому, что в более низких слоях атмосферы могут существовать значительные вертикальные градиенты температуры. Следовательно, наилучшее 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. часть I, глава 1, приложение 1.В настоящего Руководства) предоставляет дополнительное методологическое руководство по выбору места и расположению термометра в этом месте для обеспечения оптимальной репрезентативности.

2.1.4.2 **Эталонные приборы для измерения температуры**

Лабораторные эталонные приборы

Первичные эталонные термометры хранятся и обслуживаются в национальных метрологических лабораториях. Национальная метеорологическая или другая аккредитованная поверочная лаборатория должны иметь в качестве рабочего эталона высококачественный платиновый термометр сопротивления, соответствующий национальному эталону. Погрешность показаний этого термометра может периодически проверяться в камере тройной точки воды. Тройная точка воды, которая точно установлена, может воспроизводиться в камере тройной точки воды с погрешностью $1 \cdot 10^{-4}$ К.

Эталонные приборы, используемые в полевых условиях

Эталонный психрометр ВМО (WMO, 1992) представляет собой эталонный измерительный прибор для определения взаимосвязи между температурой, измеренной с помощью обычного наземного измерительного прибора, и истинной температурой воздуха. Этот прибор, спроектированный для свободного размещения и использования без экрана или защиты, является наиболее точным из имеющихся приборов для оценки и сопоставления измерительных систем. Прибор не рассчитан на постоянное использование в регулярной метеорологической деятельности и обеспечивает измерение температуры с погрешностью $\pm 0,04$ К (при уровне достоверности 95 %). Для получения более полной информации см. часть I, глава 4.

2.2 **ЖИДКОСТНЫЕ СТЕКЛЯННЫЕ ТЕРМОМЕТРЫ**

2.2.1 **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; ртуть³ обычно применяется 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. 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 ртути.

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 2.2.4). В публикации HMSO (1980) приведен обзор термометров, предназначенных для использования в метеорологической деятельности.

В любом типе защита или оправка 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.

2.2.1.1 Обычные (станционные) термометры

Эти термометры являются наиболее точными из всех, применяющихся в метеорологии. Как правило, это — ртутный стеклянный термометр. Деление его шкалы соответствует $0,2\text{ K}$ или $0,5\text{ K}$, а шкала его длиннее, чем у других метеорологических термометров.

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

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 луковицы.

Пара обычных термометров может использоваться в качестве психрометра, если один из них обернут тканью (смоченный термометр)⁴.

2.2.1.2 **Максимальные термометры**

В качестве максимального термометра рекомендуется 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.

2.2.1.3 **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 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 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.

2.2.1.4 **Почвенные термометры**

Для измерения температуры почвы на глубинах до 20 см широко применяются 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, рекомендуется использовать ртутные стеклянные термометры, заключенные в деревянные, стеклянные либо пластмассовые оправы; резервуары таких термометров должны быть покрыты воском или окрашены металлической краской. Термометры в оправе помещают в

⁴ Подробное описание смоченных термометров приведено в части I, глава 4.

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 поверхности.

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.

2.2.2 **Порядок проведения измерений**

2.2.2.1 **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.

2.2.2.2 **Измерение минимальной температуры воздуха в травостое**

Минимальная температура воздуха в травостое является самой низкой температурой, которой достигает за ночь термометр, установленный под открытым небом непосредственно над низкой травой. Температуру измеряют минимальным термометром такого типа, который описан в разделе 2.2.1.3. 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 25–50 мм над землей и касаться травы. Если земля покрыта снегом, термометр следует устанавливать над поверхностью снега — как можно ближе к поверхности снега, но так, чтобы он не касался ее.

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.

2.2.2.3 **Измерение температуры почвы**

Стандартными глубинами, на которых измеряется температура почвы, являются 5, 10, 20, 50 и 100 см ниже поверхности. Кроме перечисленных, можно устанавливать термометры и на других глубинах. Местом для проведения таких измерений должен быть ровный участок оголенной земли (размером примерно 75 см²), являющийся типичным для почвы, по которой необходима информация. Если поверхность не является типичной для данной местности, то размеры площадки должны быть не менее 100 м². 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 мере возможности, необходимо указывать физические постоянные почвы, такие, как объемная плотность, удельная теплопроводность и полевая влагоемкость. Следует также указывать уровень грунтовых вод (при залегании в пределах 5 м от поверхности) и структуру почвы.

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

2.2.3 **Размещение и установка термометров**

Как обычные, так и максимальные и минимальные термометры всегда помещают в психрометрическую будку, установленную на опоре. 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 2.2.2.2. 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.

2.2.4 **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.

2.2.4.1 **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.

2.2.4.2 **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 ртутного 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.

2.2.4.3 **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.

2.2.4.4 **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.

2.2.4.5 **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 $-115 \text{ }^\circ\text{C}$). 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.

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

2.2.5.1 **Калибровка в лабораторных условиях**

Калибровку термометров в лабораторных условиях должны проводить аккредитованные 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 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. часть IV, глава 4).

2.2.5.2 **Проверка и калибровка в условиях эксплуатации**

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 почти доверху 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 надо 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 инспекторскому термометру. Следует сделать сравнение эталонного термометра и одного или нескольких калибруемых 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 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 поверяемом 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 допуски, описанные в таблице раздела 2.1.3.2.

Почвенные термометры можно поверять 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 поверка 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.

2.2.6 **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 °С, 10 °С, 20 °С) 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 инспекторами 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 идентичные термометры.

2.2.7 **Обслуживание**

2.2.7.1 ***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.

2.2.7.2 **Нечеткость шкалы**

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

2.2.8 **Безопасность**

Ртуть, которая обычно используется 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. (Рекомендация по удалению ртути после поломки термометра дана в части I, глава 3, в разделе 3.2 по ртутным барометрам.) Существуют также ограничения при транспортировке ртутных 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.

2.3 **МЕХАНИЧЕСКИЕ ТЕРМОГРАФЫ**

2.3.1 **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.

2.3.1.1 **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 $5 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$.

2.3.1.2 **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 $5 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$.

2.3.2 **Порядок проведения измерений**

Для улучшения разрешающей способности термографы в различное 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 ветренный 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.

2.3.3 **Размещение и установка**

Эти приборы должны устанавливаться в больших психрометрических будках.

2.3.4 **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.

2.3.5 **Сравнение и калибровка**

2.3.5.1 **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.

2.3.5.2 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.

2.3.6 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 поверки.

2.3.7 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.

2.4 ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ТЕРМОМЕТРЫ

2.4.1 Общие положения

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 используемыми чувствительными элементами являются электрические элементы сопротивления, полупроводниковые термометры (термисторы) и термопары.

2.4.1.1 Электрические термометры сопротивления

Температуру вещества можно определить путем измерения его электрического сопротивления, если известен закон зависимости этого сопротивления от температуры.

При небольших изменениях температуры увеличение сопротивления чистых металлов пропорционально изменению температуры и описывается уравнением 2.2:

$$R_T = R_0 [1 + \alpha (T - T_0)] \quad (2.2)$$

где $(T - T_0)$ мало; R_T — сопротивление определенного количества металла при температуре T ; R_0 — его сопротивление при исходной температуре T_0 ; α — температурный коэффициент сопротивления при температуре T_0 .

При исходной температуре 0 °С уравнение 2.2 принимает вид:

$$R_T = R_0(1 + \alpha \cdot t) \quad (2.3)$$

При более значительных изменениях температуры и для некоторых металлических сплавов уравнение 2.4 выражает взаимосвязь более точно:

$$R_T = R_0 \left[1 + \alpha(T - T_0) + \beta(T - T_0)^2 \right] \quad (2.4)$$

При исходной температуре 0 °С уравнение 2.4 принимает вид:

$$R_T = R_0(1 + \alpha \cdot t + \beta \cdot t^2) \quad (2.5)$$

Эти уравнения дают пропорциональное изменение сопротивления реального термометра таким образом, что значения коэффициентов α и β можно найти с помощью градуировки соответствующего термометра. На основе этих результатов можно вывести обратную функцию, а именно: t как функция R . Такую функцию можно выразить в виде степенных рядов $(R_0 - R_T)$, а именно: $t = t(R_0 - R_T) = c_1(R_0 - R_T) + c_2(R_0 - R_T)^2 + \dots$

Хороший металлический термометр сопротивления должен удовлетворять следующим требованиям:

- a) физические и химические свойства должны оставаться неизменными во всем диапазоне температурных измерений;
- b) сопротивление должно постоянно и непрерывно увеличиваться при возрастании температуры во всем диапазоне измерений;
- c) внешние факторы, такие, как влажность, коррозия и физическая деформация, не должны заметно менять его сопротивление;
- d) характеристики должны оставаться постоянными на протяжении двух лет и более;
- e) сопротивление и температурный коэффициент должны быть достаточно большими, чтобы их можно было использовать в измерительной цепи.

Наилучшим образом вышеупомянутым требованиям отвечает чистая платина. Поэтому ее используют прежде всего в основных эталонных термометрах, необходимых для доведения МТШ-90 до мест установки приборов. Платиновые термометры также используются для вторичных эталонов и рабочих датчиков.

Термометры, применяемые на практике, подвергаются искусственному старению перед использованием в метеорологических целях; их обычно делают из платиновых сплавов, никеля и иногда вольфрама. Обычно они герметически запаяны стеклом или керамикой. Их постоянная времени меньше, чем постоянная времени жидкостных стеклянных термометров.

2.4.1.2 **Полупроводниковые термометры**

Другим типом термометра сопротивления, который имеет широкое использование, является термистор. Он представляет собой полупроводник с относительно большим температурным коэффициентом сопротивления, который в зависимости от используемого материала может быть либо положительным, либо отрицательным. На практике для производства термисторов применяют материалы из смеси порошкообразных окисей металлов, которые выпускаются обычно в виде небольших дисков, брусков или шариков, часто имеющих стеклянное покрытие. Общее выражение зависимости сопротивления R термистора от температуры дает уравнение 2.6:

$$R = a \exp(b/T) \quad (2.6)$$

где a и b — константы, а T — температура термистора в кельвинах.

С термометрической точки зрения преимущества термисторов заключаются в следующем:

- а) значительный температурный коэффициент сопротивления позволяет уменьшить напряжение, приложенное к мосту для измерения сопротивления, при достижении той же самой чувствительности; таким образом, уменьшается или даже устраняется необходимость принимать во внимание сопротивление контактов и его изменения;
- б) элементы можно сделать очень маленькими, что при их очень низкой теплоемкости дает небольшую постоянную времени. Однако у очень маленьких термисторов, обладающих низкой теплоемкостью, эффект самонагрева при заданной энергии диссипации выше, чем у больших термометров. Таким образом, необходимо принимать меры для того, чтобы поддерживать энергию диссипации на низком уровне.

Типовой термистор имеет сопротивление, которое изменяется на 100 или 200 единиц в температурном диапазоне от $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $40\text{ }^{\circ}\text{C}$.

2.4.1.3 Термопары

В 1821 г. Сибек установил, что в месте соединения двух разных металлов возникает незначительная контактная разность потенциалов. При составлении простой цепи на основе двух металлов и соединении их при одинаковой температуре электродвижущая сила в этой цепи не возникнет, потому что обе электродвижущие силы (одна в каждом спае) будут оказывать противодействие, нейтрализуя друг друга. При изменении температуры одного из спаев электродвижущие силы не будут уравновешивать друг друга, и в цепи возникнет результирующая электродвижущая сила и электрический ток. При нескольких спаех результирующая электродвижущая сила будет равна алгебраической сумме отдельных электродвижущих сил. Величина и знак полярности контактной электродвижущей силы, возникающей в любом спае, зависят от типов соединяемых металлов и температуры в месте спаия и могут быть эмпирически выражены для любых двух металлов следующей формулой:

$$(E_T - E_S) = \alpha(T - T_S) + \beta(T - T_S)^2 \quad (2.7)$$

где E_T — контактная электродвижущая сила при температуре T , а E_S — электродвижущая сила при некоторой стандартной температуре T_S , α и β — константы. Если имеется два спаия при температуре T_1 и T_2 , результирующая электродвижущая сила E_n (термоэлектродвижущая сила) будет $(E_1 - E_2)$, где E_1 — электродвижущая сила при температуре T_1 и E_2 — контактная электродвижущая сила при температуре T_2 . E_n с хорошим приближением может быть представлена формулой, приведенной для $(E_T - E_S)$:

$$E_n = E_1 - E_2 \quad (2.8)$$

$$E_n = a(T_1 - T_2) + b(T_1 - T_2)^2 \quad (2.9)$$

где a и b — константы двух используемых металлов. Для большинства метеорологических применений часто можно не принимать во внимание величину b , так как она всегда мала по сравнению с a .

Термопары получают путем сварки или спайки проволочек из используемых металлов. Эти спаи могут быть очень маленькими, с незначительной теплоемкостью.

Если термопара используется для измерения температуры, то измеряется электродвижущая сила, возникающая, когда один спай поддерживается при известной стандартной температуре, а другой может принимать любую температуру. При предварительной калибровке системы может быть установлена зависимость электродвижущей силы непосредственно от разности температур двух спаев, и, следовательно, неизвестная температура будет равна алгебраической сумме этой разности и известной стандартной температуры.

В метеорологии термопары в основном применяются в тех случаях, когда требуется термометр, имеющий чрезвычайно малую постоянную времени, порядка 1 или 2 с; они пригодны для проведения дистанционных измерений и регистрации и обычно используются для решения специальных исследовательских задач. При измерении абсолютного значения температуры с помощью термопары возникают трудности, связанные с необходимостью устройства для поддержания температуры холодного спая и подбора измерителя электродвижущей силы; термопары лучше всего подходят для измерения перепада температуры, так как в этом случае таких затруднений не возникает. При наличии достаточно чувствительного прибора можно достичь весьма высокой точности, но для этого необходимо проведение частых градуировок. Для метеорологических измерений подходят комбинации медь — константан или железо — константан, так как в этом случае электродвижущая сила, приходящаяся на градус Цельсия, больше, чем у более редких и более дорогих металлов, которые обычно используют при измерении высоких температур.

2.4.2 **Порядок проведения измерений**

2.4.2.1 **Электрические термометры сопротивления**

Электрические термометры сопротивления можно включать в ряд электрических измерительных цепей, многие из которых представляют собой мостовые схемы для измерения сопротивления в равновесном или неравновесном виде. В равновесном мосте подгонка прецизионного потенциометра производится до тех пор, пока индикатор не покажет отсутствие тока, причем положение стрелки потенциометра связано с температурой. В неравновесном мосте ток можно измерить с помощью гальванометра; однако в этом случае ток будет зависеть не только от температуры, на него будут частично воздействовать и другие факторы. Альтернатива, помогающая избежать данной ситуации, заключается в использовании источника тока постоянной величины для питания моста и в измерении напряжения для определения температуры.

В случае дистанционного измерения следует принять во внимание, что провода между термометром сопротивления и мостом также представляют собой сопротивление, которое изменяется в зависимости от температуры. Следует предпринять необходимые меры предосторожности во избежание таких ошибок.

Цифровые вольтметры можно использовать вместе с источником постоянного тока для измерения перепада напряжения на выходе термоэлемента, зависящего от перепада температуры; результат можно представить непосредственно в виде температурных данных. К тому же результат в цифровой форме можно хранить или передавать без потери точности и, таким образом, сделать его доступным для дальнейшего использования. При желании цифровой код вольтметров можно впоследствии преобразовать в аналоговое напряжение, например, при использовании самописца.

2.4.2.2 **Термопары**

Существует два основных способа измерения величины электродвижущей силы, возникающей в термопарах:

- a) измерение величины тока, возникающего в цепи, с помощью чувствительного гальванометра;
- b) уравнивание термоэлектрической электродвижущей силы существующей электродвижущей силой, при котором практически отсутствует электрический ток в измерительной цепи.

При способе (а) гальванометр соединяется напрямую последовательно с двумя спаями. Способ (b) обычно используется, если требуется точность измерения более 0,5 %. Эта процедура не зависит от величины или изменения сопротивления линии, так как в уравновешенном состоянии в цепи нет тока.

2.4.3 **Размещение и установка**

Требования к размещению и установке электрических термометров в основном такие же, как и для жидкостных стеклянных термометров (см. раздел 2.2.3). Исключения заключаются в следующем:

- a) измерение экстремальных температур: если электрический термометр соединить с непрерывно действующей системой записи данных, то максимальные и минимальные термометры больше не потребуются;
- b) измерение приземных температур: 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;
- c) измерение температуры почвы: жидкостные стеклянные термометры в вертикальных металлических трубках не подходят для измерения дневного колебания температуры почвы в связи с тем, что трубки служат в качестве проводников тепла с земной поверхности. Более репрезентативные показания можно получить, поместив электрические термометры в латунные оправы и погрузив их 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.

2.4.4 **Источники погрешностей**

2.4.4.1 **Электрические термометры сопротивления**

Основными источниками погрешностей при измерении температуры электрическими термометрами сопротивления являются:

- a) самонагревание элемента термометра;
- b) 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.

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. Эти ошибки можно компенсировать за счет использования дополнительных проводников,

балластных резисторов и соответствующей мостовой схемы. Чтобы уменьшить погрешности, настоятельно рекомендуется использовать четырехжильные платиновые термометры сопротивления.

Ни электрический термометр сопротивления, ни термистор не отвечают требованиям линейности во всем диапазоне измеряемых температур, однако, если ограничить диапазон, они могут приблизиться к требуемой линейности. Следовательно, необходимо обеспечить компенсацию таких нелинейностей. Вероятнее всего, это необходимо для термисторов в целях достижения приемлемого диапазона метеорологических измерений.

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 2.4.5).

2.4.4.2 **Термопары**

Основными источниками погрешностей при измерении температуры с использованием термопар являются:

- a) изменения сопротивлений соединительных проводов с изменением температуры. Этот эффект можно свести к минимуму, если использовать очень короткие, компактные и надежно изолированные провода;
- b) проводимость вдоль проводов от спая при наличии градиента температуры в пространстве вокруг точки измерения температуры;
- c) случайные вторичные термоэлектродвижущие силы, возникающие в результате использования в соединительной цепи металлов, отличных от металлов термопары. Следовательно, необходимо по возможности сводить к минимуму разность температур термопары и остальной части; это особенно важно в случае небольших значений электродвижущих сил, которые нужно измерять (для достижения этого необходимо проведение периодических поверок);
- d) наличие тока утечки из соседних электрических цепей. Это влияние можно свести к минимуму с помощью соответствующего экранирования проводов;
- e) возникновение гальванических токов в результате смачивания выводов или спаев;
- f) изменения температуры гальванометра, меняющие его характеристики (в основном меняется его сопротивление). Это ни в коей мере не влияет на снятие показаний с помощью потенциометра, но оказывает влияние на измерительные приборы с непосредственным отсчетом показаний. Этот эффект можно свести к минимуму, поддерживая температуру гальванометра как можно более близкой к той, при которой производилась поверка цепи;
- g) изменения электродвижущей силы стандартного элемента, по которому регулируется потенциометрический ток, при проведении потенциометрических измерений, а также изменения потенциометрического тока между регулировками вызывают соответствующие ошибки в значениях измеренной электродвижущей силы. Обычно эти ошибки незначительны, если стандартный элемент используется правильно, и ток потенциометра регулируется непосредственно перед измерением температуры.

Погрешности, описанные в пунктах (a) и (f), указывают на то, что предпочтительнее использовать потенциометрический метод в тех случаях, когда требуется очень высокая точность измерений.

2.4.5 Сравнение и калибровка

2.4.5.1 Электрические термометры сопротивления

Основные методы и процедуры лабораторных калибровок и поверок в условиях эксплуатации электрических термометров такие же, как и у жидкостных стеклянных термометров (см. раздел 2.2.5). Однако, как правило, нельзя размещать в помещении только термометр сопротивления, поскольку одним из пунктов проверки являются стандартные электрические провода. Следовательно, нужно проводить проверки экранированных термометров. Для того чтобы произвести точное сличение показаний электрических термометров или термометров сопротивления с эталонным стеклянным ртутным термометром, отражающим температуру окружающей среды, необходимо присутствие двух наблюдателей. Поскольку измерительный прибор является составной частью электрического термометра, то его градуировку можно проверить, заменив термометр сопротивления прецизионным декадным магазином сопротивлений и устанавливая сопротивления, эквивалентные приращениям температуры в 5 К в пределах рабочего диапазона температуры. Погрешность в любой точке не должна превышать 0,1 К. Обычно эта работа выполняется специалистом технической службы.

2.4.5.2 Термопары

Для проведения калибровки и проверки термопар необходимо поддерживать горячие и холодные спаи при точно известных температурах. Способы и средства измерения, необходимые для проведения этой работы, обычно очень специализированные и здесь не приводятся.

2.4.6 Поправки

При изготовлении электрические термометры (имеющие серийный номер) должны быть снабжены:

- a) паспортом с указанием даты, подтверждающим соответствие определенному стандарту; либо
- b) свидетельством о поверке с указанием даты поверки и значений фактического сопротивления в реперных точках диапазона температур. Эти значения сопротивления 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 К.

2.4.7 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. Точное определение источника таких погрешностей и их корректировка требуют специального оборудования и подготовки кадров и должны производиться только персоналом по техническому обслуживанию и ремонту.

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 избежать погрешностей измерения в тех случаях, когда микроклимат внутри огороженного пространства отклоняется от микроклимата окружающей воздушной массы. Такое отклонение возникает только при очень низкой скорости естественного ветра ($< 1 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$). 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. Производителям средств радиационной защиты с принудительной вентиляцией рекомендуется обеспечивать наличие четкого указания (например, светодиодный 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 неоокисленный металл с тщательно отполированной поверхностью, так как он обладает высокой отражательной способностью и низкой теплоемкостью. Однако, предпочтительнее использовать термоизоляционный материал в связи с несложными требованиями к его техническому обслуживанию. Если система основана на принципе естественной вентиляции, то в обязательном порядке следует использовать термоизоляционный материал.

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 автоматических метеорологических станций, 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).

2.5.1 Жалюзийные будки

В большинстве различных типов жалюзийной будки используется принцип естественной вентиляции. Желательно, чтобы стены такой будки имели двойные жалюзи, а пол был 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 жалюзей, 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. часть I, 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).

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

Реперные точки Международной температурной шкалы, принятой в 1990 г. (МТШ-90), представляющие интерес для метеорологических измерений, приведены в таблице 2.А.1; вторичные реперные точки, представляющие интерес для метеорологических измерений, даны в таблице 2.А.2.

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 $-259,34$ °С до $961,78$ °С, является платиновый термометр сопротивления.

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

Связь между сопротивлением платинового термометра сопротивления, 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 платиновых термометров сопротивления (определено в МЭК 60751, см. МЭК (2008)), а не для эталонных платиновых термометров сопротивления:

$$R_t = R_0 \left(1 + A \cdot t + B \cdot t^2 + C \cdot (t - 100) \cdot t^3 \right)$$

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

Таблица 2.А.1. Определение реперных точек по МТШ-90

Состояние равновесия	Присвоенное значение МТШ	
	К	°С
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

Таблица 2.А.2. Вторичные реперные точки и их температуры по МТШ-90

Состояние равновесия	Присвоенное значение МТШ	
	К	°С
Равновесие между твердой и парообразной фазами двуокиси углерода (точка сублимации двуокиси углерода) при стандартном атмосферном давлении p_0 (1 013,25 гПа).		
Температура t в зависимости от давления пара двуокиси углерода выводится из уравнения:		
$t = [1,210\ 36 \cdot 10^{-2} (p - p_0) - 8,912\ 26 \cdot 10^{-6} (p - p_0)_2 - 78,464]$ °С		
где p — атмосферное давление в гПа в пределах температуры 194–195 К	194,686	–78,464
Равновесие между твердой и жидкой фазами ртути (точка замерзания ртути) при стандартном атмосферном давлении	234,296	–38,854
Равновесие между льдом и насыщенным воздухом водой (точка льда) при стандартном атмосферном давлении	273,150	0,00
Равновесие между твердой, жидкой и парообразной фазами феноксибензола (дифенилового эфира) (тройная точка феноксибензола)	300,014	26,864

СПРАВОЧНАЯ И ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА

- Andersson, T. and I. Mattison, 1991: *A Field Test of Thermometer Screens*. SMHI Report No. RMK 62, Norrköping.
- 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/utis/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/utis/common/pdf/its-90/ITS-90_metrologia.pdf).
- Her Majesty's Stationery Office (HMSO)/Meteorological Office, 1980: *Handbook of Meteorological Instruments*, Volume 2: Measurement of temperature, London.
- 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.
- 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.
- 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. L alas). 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). *Papers 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). *Papers 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). *Papers 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). *Papers 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). *Papers 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). *Papers 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). *Papers 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). *Papers 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). *Papers 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.
- , 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.
-