

ГЛАВА 4. ИЗМЕРЕНИЕ ВЛАЖНОСТИ

4.1 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Измерение влажности воздуха, а часто и ее постоянная регистрация требуются в большинстве областей метеорологической деятельности. Настоящая глава посвящена измерению влажности воздуха у поверхности Земли или вблизи нее. На практике для этого используется много различных методов, и по этому вопросу существует обширная литература. Методы описываются в публикациях Burt (2012), Harrison (2014) и Sonntag (1994). Более старый, но все еще полезный общий обзор многих принципов измерений приведен в работе Wexler (1965).

4.1.1 Определения

Ниже приведены определения характеристик, наиболее часто используемых при измерении влажности воздуха. Дополнительные определения даются в приложении 4.А.

Отношение смеси r . Отношение массы водяного пара к массе сухого воздуха;

Удельная влажность q . Отношение массы водяного пара к массе влажного воздуха;

Температура точки росы или точка росы t_d . Температура, при которой отношение смеси влажного воздуха, насыщенного относительно воды при заданном давлении, равно заданному отношению смеси; или более просто, температура, при которой влажный воздух насыщен водяным паром;

Относительная влажность воздуха U . Процентное отношение давления имеющегося в воздухе водяного пара к давлению водяного пара, насыщенного относительно воды, при одинаковых значениях температуры и давления; термин «*относительная влажность*» часто сокращается как *ОВ*;

Давление водяного пара e' . Парциальное давление водяного пара в воздухе;

Давление насыщенного водяного пара e'_w и e'_i . Давление водяного пара в воздухе при условии равновесия относительно поверхности воды и льда соответственно.

В приложении 4.В представлены формулы для расчета различных характеристик влажности воздуха. Эти варианты формул и коэффициентов были приняты ВМО в 1990 г.¹ Они удобны для расчетов и обладают достаточной точностью для всех обычных метеорологических применений строго в пределах температурных ограничений $T > -45\text{ °C}$ для жидкой воды и $T > -65\text{ °C}$ для льда (WMO, 1989a). С более точными, расширенными и подробными формулировками этих и других характеристик влажности воздуха можно ознакомиться в работе Sonntag (1990; 1994). Другие подробные формулировки² представлены в публикациях ВМО (ВМО, 1966, введения к таблицам 4.8–10).

¹ Приняты Исполнительным советом на его сорок второй сессии посредством резолюции 6 (ИС-XLII).

² Приняты Четвертым конгрессом посредством резолюции 19 (Кг-IV).

4.1.2 Единицы измерения

Для количественного выражения наиболее часто используемых физических величин, связанных с содержанием водяного пара в атмосфере, как правило, используются следующие единицы измерения и символы:

- a) отношение смеси r и удельная влажность q (безразмерное отношение масс, в килограммах на килограмм $\text{кг} \cdot \text{кг}^{-1}$);
- b) давление водяного пара в воздухе e' , e'_w , e'_i и атмосферное давление p (в единицах давления, например гПа)³;
- c) температура воздуха t , температура смоченного термометра t_w , температура точки росы t_d и температура точки инея t_i (в градусах Цельсия, °C);
- d) температура воздуха T , температура смоченного термометра T_w , температура точки росы T_d и температура точки инея T_i (в К, используется для определенных расчетов влажности и для выражения разности, а не для общего выражения значений влажности);
- e) относительная влажность воздуха U (в процентах; также часто используется альтернативный символ, % ОВ, чтобы избежать путаницы с другими процентными выражениями; используется в этой главе).

4.1.3 Метеорологические потребности

Измерения влажности у поверхности Земли необходимы для анализа метеорологических процессов и прогнозирования, для исследований климата; они находят применение в гидрологии, сельском хозяйстве, авиации и в общих исследованиях окружающей среды. Особенно важное значение они имеют в связи с изменениями состояния воды в атмосфере.

Общие требования относительно диапазона, разрешения и точности измерений влажности приведены в настоящем томе, глава 1, приложение 1.А. Перечисленные в этой таблице погрешности представляют собой требования, а не характеристики работы конкретных приборов. На практике нелегко достичь таких значений погрешности, даже при использовании приборов высокого класса, которые надлежащим образом обслуживаются и эксплуатируются. В частности, значительно более низкая точность может быть получена при измерении влажности воздуха с помощью психрометра, размещаемого в метеорологической будке без принудительной вентиляции, и такая установка все еще встречается. Даже современные электронные приборы для измерения влажности могут иметь значительный по сравнению с потребностями дрейф.

При измерениях влажности для большинства целей приемлемы постоянные времени порядка одной минуты. Время ответных реакций, возникающих в рабочих приборах, обсуждается в п. 4.8.1.

4.1.4 Методы измерений и наблюдений

Общие обзоры приборов для измерения влажности в метеорологии и их использования приведены в работах Burt (2012), Harrison (2014) и Sonntag (1994). В работе Wexler (1965) приводятся несколько устаревшие, но все еще полезные сведения о многих принципах работы гигрометров.

³ 1 гПа = 1 мбар.

4.1.4.1 **Обзор общих принципов измерений**

Прибор для измерения влажности воздуха называется гигрометром. В следующих подразделах приводятся физические принципы, наиболее широко используемые для измерения влажности в метеорологии. Отчеты по международным сравнениям различных гигрометров под эгидой ВМО приведены в публикациях WMO (2011a, 1989b).

Основные методы и типы приборов, используемые в метеорологии для измерения относительной влажности, рассматриваются в п. 4.1.4. Некоторые устаревшие или более не используемые методы и инструменты кратко описаны в приложении 4.C.

4.1.4.1.1 **Электронное зондирование**

В электронных приборах для измерения относительной влажности используется принцип изменения электрических свойств материала при поглощении переменного количества водяного пара из воздуха. В качестве материала для измерения относительной влажности обычно используется специальная полимерная пленка с нанесенными электродами. Измеренное изменение электрического импеданса (емкости или сопротивления) преобразуется для обозначения относительной влажности. Обычно в корпус прибора также встраивается компактный датчик температуры.

Для дистанционных измерений все шире используются гигрометры на основе датчиков относительной влажности, особенно там, где требуется непосредственно считывать показания относительной влажности и автоматически регистрировать данные.

Наряду с данными о влажности важно иметь информацию о температуре, поскольку относительная влажность сильно зависит от температуры, а также потому, что значения температуры необходимы для расчета других величин влажности (таких как точка росы) на основе относительной влажности. В электронных приборах для измерения относительной влажности для метеорологических наблюдений обычно не используется встроенный датчик температуры; нормально измерять температуру отдельно.

Наиболее удобной и передовой технологией для метеорологических применений являются емкостные полимерные гигрометры, поскольку их легче производить, обслуживать и калибровать. Более подробная информация об электрических емкостных гигрометрах приводится в п. 4.2.

Гигрометры электрического сопротивления описаны в приложении 4.C.4, хотя они обычно не используются в метеорологии.

4.1.4.1.2 **Психрометрический метод**

Психрометр измеряет охлаждение в результате испарения с влажной поверхности. Охлаждение в стабильном состоянии может быть соотнесено с парциальным давлением водяного пара и относительной влажностью.

Психрометр состоит из двух размещенных рядом друг с другом термометров. Поверхность чувствительного элемента одного из них накрыта рукавом, удерживающим тонкую пленку воды или льда, и такой термометр называется смоченным термометром или покрытым льдом термометром, соответственно. Чувствительный элемент второго термометра просто находится на воздухе, и этот термометр называется сухим термометром. Измерения проводятся в условиях принудительной или естественной вентиляции.

Психрометры по-прежнему используются для ведения наблюдений, хотя их все чаще заменяют на гигрометры на основе электронных датчиков. Иногда психрометры также используются в качестве рабочих эталонов.

Более подробная информация об этом типе приборов приведена в п. 4.3.

4.1.4.1.3 Метод конденсации

Температура конденсации водяного пара (точка росы или точка инея) связана с парциальным давлением воды, и ее можно измерить с помощью гигрометра с охлаждаемым зеркалом (конденсационного гигрометра).

Когда влажный воздух охлаждается, он в конечном итоге достигает насыщения относительно воды (или льда), и может образоваться конденсат в виде росы или инея. Температура, при которой достигается состояние насыщения, является точкой росы (или точкой инея).

В обычном гигрометре с охлаждаемым зеркалом используется небольшая зеркальная поверхность, охлаждаемая с помощью устройства, основанного на эффекте Пельтье, для получения пленки воды или льда. Обычно оптическое обнаружение конденсированной пленки используется в контуре обратной связи для контроля температуры на пороге постоянной конденсации. Эта температура измеряется с помощью встроенного температурного датчика. Измеряемый воздух обычно отбирается через трубку и пропускается через прибор.

Конденсационные гигрометры не находят широкого применения в области метеорологических наблюдений, но обычно используются в качестве лабораторных эталонных приборов.

Более подробная информация об этом типе приборов приведена в п. 4.4.

4.1.4.1.4 Спектрометры водяного пара

Молекула воды поглощает ЭМИ в ряде диапазонов длин волн и на дискретных длинах волн, и это свойство может быть использовано для получения меры молекулярной концентрации водяного пара в газе. Этот принцип применяется в различных приборах и в соответствии с ним используются линии поглощения разной силы для разных диапазонов измерений (более сильное поглощение для более низких концентраций).

В простейшей форме прибор измеряет передачу (или поглощение) узкополосного ИК-излучения от источника с фиксированной интенсивностью к калиброванному детектору, иногда в сравнении с эталонной длиной волны. Некоторые приборы, основанные на этом принципе, могут измерять диапазоны влажности, наблюдаемые на уровне земли.

В диапазоне следов водяного пара абсорбционные спектрометры измеряют поглощение ИК-излучения при многократном отражении при прохождении через газ в измерительной ячейке, что обеспечивает большую длину оптического пути для расширения диапазона вниз. Прибором особого типа является спектрометр с адаптивным диодным лазером. Амплитуда поглощения света зависит от концентрации водяного пара.

В нисходящей спектроскопии внутри кольцевого резонатора также используется ИК-поглощение при прохождении длинного пути для измерения следовых концентраций. Световой импульс многократно отражается в газе в измерительной ячейке. Замеряется время затухания интенсивности света, которое зависит от концентрации водяного пара.

Гигрометры Лаймана-альфа работают в ультрафиолетовом (УФ) диапазоне. Ультрафиолетовый свет от прибора поглощается молекулами воды пропорционально концентрации водяного пара. Так называемая «линия Лаймана-альфа» соответствует излучению, испускаемому или поглощаемому при энергетическом переходе атомарного водорода.

Абсорбционные спектрометры и прибор Лаймана-альфа используются для некоторых самолетных наблюдений, включая измерение следовых уровней воды на больших высотах полета. Преимущество для этих видов применения заключается в относительно быстром времени отклика таких приборов.

Более подробная информация об этом типе приборов приведена в п. 4.5.

4.1.4.1.5 **Механические методы**

Исторически сложилось так, что для обозначения относительной влажности в гигрометрах используется изменение размеров органических веществ. Процессы сорбции воды в веществах связаны с относительной влажностью, поскольку движущей силой является химический потенциал. В качестве чувствительных элементов использовались, в частности, волосы и в последнее время синтетические волокна. Изменение длины чувствительного элемента в зависимости от влажности усиливается с помощью системы рычагов, которая перемещает указатель для обозначения относительной влажности на шкале, графике (записях гигрографа) или, реже, передачи данных через преобразователь на электрический выход.

В метеорологии до сих пор используется только волосной гигрограф, хотя он постепенно выходит из употребления. Более подробная информация об этом приборе приведена в п. 4.6.

4.1.4.2 **Размещение приборов: общие требования**

Общие требования к размещению приборов для измерения влажности воздуха аналогичны требованиям для датчиков температуры, и для этой цели может быть использована размещенная надлежащим образом психрометрическая будка. Конкретно предъявляются следующие требования:

- a) обеспечение защиты датчика от прямого солнечного излучения, атмосферных загрязняющих веществ, дождя и ветра;
- b) контроль за тем, чтобы не создавался местный микроклимат внутри кожуха прибора или пробоотборника; следует иметь в виду, что дерево и многие синтетические материалы поглощают или выделяют водяной пар в зависимости от атмосферной влажности.

Информация о конкретных приборах приводится в пп. 4.2–4.6.

В классификации размещения площадок для станций наземных наблюдений на суше (см. настоящий том, глава 1, приложение 1.D) содержатся дополнительные рекомендации по выбору площадки и местоположению гигрометра на площадке для оптимизации репрезентативности.

4.1.4.3 **Источники погрешностей: общие замечания**

Погрешности при измерении влажности могут быть вызваны любой из следующих причин:

- a) изменение состояния пробы воздуха: например, под воздействием тепла либо источника или поглотителя водяного пара;
- b) загрязнение датчика, например, грязью, брызгами морской воды, химическим воздействием или другими загрязнениями;
- c) ошибка калибровки, включая корректировку влияния давления, температурный коэффициент датчика и электрического устройства сопряжения;

- d) неправильное определение фазы вода/лед;
- e) недочеты в конструкции прибора: например, препятствия для поступления тепла к смоченному термометру или передача тепла от столбика жидкости термометра к резервуару смоченного термометра;
- f) медленное время отклика прибора или невозможность достижения стабильного равновесия в ходе эксплуатации;
- g) неправильный отбор проб и/или выбор интервалов усреднения;
- h) гистерезис: многие приборы для измерения влажности показывают разные значения в зависимости от того, из какого состояния они приближаются к текущим условиям: из более влажного или более сухого;
- i) длительный дрейф между калибровками, особенно у электронных приборов для измерения влажности в условиях высокой относительной влажности;
- j) радиационный нагрев датчика влажности до температуры выше температуры воздуха: например, из-за нагрева от радиационного экрана, который сам нагревается от солнечного излучения;
- k) ошибка любого рода при измерении температуры, если значение температуры используется при расчете других величин влажности (например, при расчете точки росы по относительной влажности).

Постоянная времени датчика (см. п. 4.8.1), время усреднения выходного результата и потребности в данных должны быть взаимно согласованными.

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

4.1.4.4 **Уход за приборами: общие положения**

Руководства по эксплуатации подавляющего большинства имеющихся в продаже гигрометров имеются в сети Интернет в свободном доступе. Как правило, это хороший источник рекомендаций по обслуживанию приборов, а производители обычно могут проконсультировать по конкретным вопросам и будут рады это сделать.

Рассмотрим следующие процедуры технического обслуживания приборов:

- a) Поддержание чистоты: приборы и их кожухи должны содержаться в чистоте. Некоторые приборы для измерения влажности, например, датчики волосяных гигрометров и гигрометров с охлаждаемым зеркалом, должны промываться дистиллированной водой, и такую процедуру следует проводить регулярно. Другие датчики, особенно имеющие определенное электролитическое покрытие, а также некоторые датчики с полимерной основой ни в коем случае нельзя очищать. В связи с этим чрезвычайно важно наличие инструкций по очистке приборов для наблюдателей и обслуживающего персонала.
- b) Калибровка полевых приборов: все приборы для измерения влажности, эксплуатируемые в полевых условиях, нуждаются в регулярной калибровке. Калибровка выявляет любые ошибки в показаниях за счет сравнения с эталоном. В идеале такие ошибки устраняются путем внесения поправок (например, за счет корректировки, для электронного гигрометра). Любые неисправленные ошибки необходимо рассматривать как часть погрешности измерения. Калибровка должна

проводиться с использованием эталона с метрологической прослеживаемостью (JCGM, 2012) до национального стандарта, где это возможно (см. настоящий том, глава 1, приложение 1.В).

- с) В промежутках между калибровками полезно проводить поверку полевых приборов. Для оценки надежности работы можно использовать проверку по другому прибору. Результаты поверок обычно оцениваются в соответствии с допуском или критерием, основанным на погрешности двух сравниваемых приборов.

Полевые гигрометры удобно поверять с помощью калиброванного электронного гигрометра. Прибор, используемый для таких поверок, должен быть уравновешен в соответствии с местной температурой окружающей среды и иметь время отклика в пределах периода, допустимого для поверки.

На рынке представлены системы насыщенных солевых растворов, которые можно использовать как для поверки, так и для калибровки. Однако они должны быть уравновешены до температуры окружающей среды, а для самой соляной смеси может потребоваться дополнительное время для уравновешивания, чтобы создать нужную влажность. Трудно быть уверенным в надежности таких приборов при их использовании в полевых условиях, если только они не применяются вместе с переносным эталоном (калиброванным гигрометром).

Преимущество использования аспирационного психрометра стандартного вида, такого как психрометр Ассмана, в качестве полевого эталона заключается в том, что он может проходить определенную самопроверку путем сравнения сухого и (без защитной оболочки) смоченного термометров и что при наличии хорошо работающего вентилятора можно ожидать надлежащей аспирации. Вместе с тем, во время работы психрометры выделяют водяной пар, и это может повлиять на условия влажности в окружающей атмосфере и, возможно, ограничить точность проверки, если прибор находится вблизи сравниваемого прибора.

Для проведения любой калибровки или поверки эталонный прибор и сам должен подвергаться калибровке через установленные для этого типа приборов интервалы времени.

Важно проводить калибровку электрических устройств измерительного преобразования, как на регулярной основе, так и в ходе их оперативного использования. Для этой цели вместо датчика может быть использован имитатор. Однако при этом необходимо проводить калибровку всей измерительной системы, начиная с датчика и кончая измерительным прибором, поскольку ошибки калибровки для датчиков и для устройств измерительного преобразования, которые по отдельности находятся в рамках спецификаций, при суммировании для всей измерительной системы могут оказаться за пределами спецификации.

Подробные требования к обслуживанию различных классов описываемых в настоящей главе гигрометров приводятся в соответствующих разделах ниже.

4.1.5 **Последствия Минаматской конвенции с точки зрения измерения влажности**

Минаматская конвенция ЮНЕП о ртути вступила в силу во всем мире в августе 2017 года и запрещает любое производство, импорт и экспорт ртутных термометров (см. настоящий том, глава 1, 1.4.2). В связи с этим больше не рекомендуется применять приборы для измерения влажности, основанные на ртутных термометрах, и настоятельно поощряются надлежащие меры для их скорейшей замены на современные альтернативы.

4.2 ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЕМКОСТНЫЕ ГИГРОМЕТРЫ

4.2.1 Соображения общего характера

В электронных приборах для измерения относительной влажности используется принцип изменения электрических свойств вещества при поглощении переменного количества водяного пара из воздуха. Процессы сорбции воды в веществах связаны с относительной влажностью, поскольку движущей силой является химический потенциал. В качестве материала для измерения относительной влажности обычно используется специальная полимерная пленка с нанесенными электродами. Измеренное изменение электрического сопротивления преобразуется для обозначения относительной влажности. Обычно в корпус прибора также встраивается компактный датчик температуры.

Датчик влажности, как правило, размещается в корпусе с встроенным компактным датчиком температуры. Область датчика обычно защищена ограждением или фильтром. Кроме того, сам датчик влажности часто непосредственно заключен в корпус из защитного пористого материала.

Как правило, в приборы встраивается линеаризующая электроника, при необходимости с температурной компенсацией, для оптимизации точной реакции на относительную влажность. Производители поставляют различные системы отображения, обработки или регистрации данных. В некоторых случаях такие системы являются неотъемлемой частью прибора; а в других кабель подсоединяется к соответствующему блоку электроники.

Гигрометры с электрическими датчиками относительной влажности воздуха все чаще используются в дистанционных приборах, в частности там, где требуется прямое визуальное отображение значений относительной влажности.

4.2.2 Электрический емкостный гигрометр

Данный метод основан на явлении изменения диэлектрических свойств твердого гигроскопичного материала в зависимости от относительной влажности окружающего воздуха. Для изготовления датчиков влажности выбираются или специально разрабатываются чувствительные диэлектрические материалы. Наиболее часто используются полимеры благодаря их стабильности, селективности и сорбции воды, а также потому, что с помощью таких материалов достигаются надлежащие свойства конденсатора. Вода, находящаяся в связанном состоянии в полимере, изменяет его диэлектрические свойства вследствие большого дипольного момента молекулы воды.

Как правило, датчик влажности размещается на керамической или стеклянной подложке. Это стопка параллельно расположенных тонких пленок с толщиной слоя от нескольких нанометров до одного микрометра. Активная часть датчика влажности состоит из полимерной пленки, помещаемой между двух электродов для получения конденсатора. Верхний электрод проницаем для молекул воды, а полимер поглощает воду пропорционально относительной влажности. Верхний электрод также может быть покрыт защитным слоем для повышения стабильности в суровых условиях окружающей среды.

Емкость служит основой для измерения относительной влажности. Номинальное значение емкости может составлять лишь несколько сот пикофард в зависимости от размера электродов и толщины диэлектрика. Это, в свою очередь, влияет на диапазон частоты возбуждения, которая используется для измерения полного сопротивления данного устройства и, как правило, составляет, по меньшей мере, несколько килогерц; соответственно требуется, чтобы соединения между датчиком и электронным средством обработки сигнала были короткими для сведения к минимуму паразитной емкости. В связи с этим в прибор с емкостными датчиками часто встраивается система обработки сигналов. Типичная чувствительность для устройства в 200 pF составляет 0,5 pF на % ОВ.

Для предотвращения образования конденсата, когда условия приближаются к 100 % ОВ, производители приборов предлагают различные варианты обогрева. Датчик может

нагреваться встроенным нагревателем или нагревается весь корпус. Управление нагревом осуществляется либо по разности температур между температурой окружающей среды и внутренней температурой, либо по пороговому значению относительной влажности. Для получения хороших результатов измерений очень важно точно измерять как температуру датчика влажности, так и температуру окружающего воздуха. Используя относительную влажность, измеренную датчиком, температуру датчика и температуру воздуха, можно рассчитать относительную влажность воздуха. Даже при неизвестной температуре воздуха измерение с подогревом может применяться для определения температуры точки росы. Дрейф, связанный с химическим воздействием, можно уменьшить, используя встроенный нагреватель для нагрева датчика влажности с повторяющимися интервалами в течение короткого времени при высокой температуре. Недостатком такого способа является время простоя во время нагрева.

4.2.3 Процедура наблюдений

Гигрометры с электронными датчиками относительной влажности часто используются в АМС, а также везде, где требуется измерение влажности без обслуживания персоналом или с регистрацией данных.

Наблюдения температуры крайне важны наряду с наблюдениями влажности, поскольку значения температуры используются для расчета других величин влажности (таких как точка росы) на основе относительной влажности. Для этого обычно используется отдельный термометр, а не встроенный датчик температуры в электронных приборах для измерения относительной влажности.

4.2.4 Размещение и установка

Корпус гигрометра следует монтировать внутри психрометрической будки. Необходимо следовать рекомендациям производителей относительно установки каждого конкретного прибора. Для минимизации загрязнения, которое может привести к прогрессирующей ошибке, важно использовать защитный фильтр. Приборы, в которых в качестве чувствительного элемента используется гигроскопичный электролит, будут повреждены при прямом контакте с жидкостью. Намоченные емкостные датчики часто могут хотя бы частично восстановиться после просушивания. Однако воздействие высокой или конденсирующейся влажности связано с долгосрочным дрейфом некоторых емкостных датчиков.

4.2.5 Источники ошибки

Измерения с помощью датчиков относительной влажности могут быть особенно подвержены влиянию любой из следующих причин ошибок:

- Может присутствовать ошибка калибровки, когда при первоначальной настройке прибора сохраняются остаточные неисправленные ошибки. Такая ошибка может иметь нелинейный характер или какую-либо иную форму. Также может оказаться, что она зависит от температуры, поскольку обычно невозможно провести калибровку при нескольких температурах или определить температурную зависимость калибровочных характеристик.
- Датчики могут подвергаться загрязнению; например, грязью, брызгами морской воды, химическим воздействием или другими загрязнениями. Ошибка такого типа может проявляться в виде снижения чувствительности во всем диапазоне, с завышением показаний при низкой влажности и занижением показаний при высокой влажности, или же она может обнаруживать какую-либо другую закономерность.
- Гистерезис может воздействовать на электронные приборы для измерения влажности так, что они будут показывать разные значения в зависимости от того, из какого

состояния они приближаются к текущим условиям: из более влажного или более сухого. Время отклика также может отличаться для нарастающих и уменьшающихся изменений состояния.

- Длительный дрейф между калибровками может быть значительным, особенно для приборов, подверженных воздействию высокой или конденсирующейся относительной влажности (роса, туман или другое увлажнение). Такой дрейф чаще всего происходит вверх при высокой влажности, хотя может идти и вниз, и сильно варьируется (Burt, 2012; Bell et al., 2017). Дрейф в сторону увеличения приводит к завышению показаний при высоких значениях влажности, например, отображению 100 % ОВ при состоянии 95 % ОВ. Датчики с подогревом потенциально менее подвержены такому дрейфу.
- Радиационный нагрев датчика влажности до температуры выше температуры воздуха может означать, что датчик теплее воздуха. Это может происходить даже внутри будки, если сама будка нагревается от солнечного излучения. Это может приводить к ложному занижению показаний относительной влажности.

Ошибка любого рода при измерении температуры имеет важное значение с точки зрения относительной влажности, если оба показателя используются при расчете других величин влажности (например, при расчете точки росы по относительной влажности). В таких расчетах ошибка в 0,1 °C вблизи 20 °C имеет такой же эффект, как и ошибка в 0,6 % ОВ. В публикации ВМО (WMO, 2011a) приводится подробное описание этого эффекта при других температурах.

4.2.6 Калибровка и инспекция в полевых условиях

При калибровке выявляются любые ошибки в показаниях путем сравнения с эталоном. Калибровка приборов для измерения относительной влажности обычно проводится в лаборатории и включает сравнение с эталоном относительной влажности, что часто производится в камере для климатических испытаний. Калибровки должны проводиться с использованием эталона с метрологической прослеживаемостью до национального стандарта, где это возможно (см. настоящий том, глава 1, приложение 1.B). Более подробная информация приведена в п. 4.7 и в главе 4 тома V настоящего Руководства.

В идеале калибровка осуществляется путем внесения корректировок (обычно, для электронного гигрометра путем регулировки прибора). Для некоторых электронных гигрометров корректировка может быть выполнена с помощью программного обеспечения производителя во время калибровки. В других случаях регулировка может осуществляться путем настройки потенциометров, соответствующих «диапазону» и «нулю» показаний гигрометра. Хотя калибровочные поправки можно применять арифметически, это имеет больший смысл в лабораторных условиях, чем в метеорологических применениях. Любые неисправленные ошибки калибровки необходимо рассматривать как часть погрешности измерения.

Полевые инспекции электронных приборов для измерения относительной влажности включают в себя проверку состояния и функционирования приборов. В частности, проверяется состояние фильтра датчика, который очищается или заменяется в случае загрязнения.

Полевые поверки гигрометров удобно проводить с помощью другого калиброванного электронного гигрометра. Прибор, используемый для таких проверок, должен быть уравновешен в соответствии с местной температурой окружающей среды. Он должен быть либо откалиброван при температуре использования, либо должна быть сделана поправка для различных температур эксплуатации. Время отклика гигрометра, используемого для любой проверки в полевых условиях, должно находиться в пределах периода времени, отведенного на проверку. Обычно в ходе проверки имеется определенный критерий приемлемости.

В принципе, проверку приборов для измерения относительной влажности в полевых условиях можно проводить с помощью солевых систем, которые поставляются некоторыми производителями приборов. Такие системы надежно работают только после того, как придут в полное равновесие с местной температурой окружающей среды. В связи с этим трудно быть уверенным в надежности таких приборов при их использовании в полевых условиях. В принципе, для проверки на месте можно использовать генератор влажности в полевых условиях, но они не так широко доступны. Более подробная информация приведена в разделе 4.7.6.3.

В качестве полевого эталона рекомендуется использовать аспирационный психрометр стандартного вида, такой как психрометр Ассмана. Вместе с тем, во время работы психрометры выделяют водяной пар, и это может повлиять на окружающие условия влажности и, возможно, сказаться на точности проверки, если прибор находится вблизи сравниваемого прибора.

Для любой калибровки или проверки эталонный прибор и сам должен подвергаться калибровке через установленные для такого типа приборов интервалы времени.

При необходимости проверка электронного гигрометра должна включать проверку интерфейсов регистрации данных. Для этой цели вместо датчика может быть использован имитатор. В зависимости от конфигурации системы может потребоваться проверка всей системы (гигрометр и интерфейс). Например, в более старых системах ошибки калибровки для датчиков и для устройств измерительного преобразования, которые по отдельности находятся в рамках спецификаций, при суммировании для всей измерительной системы могут оказаться за пределами спецификации.

4.2.7 Обслуживание

Наблюдателям рекомендуется содержать гигрометр в чистоте (см. 4.1.4.4). Если прибор оснащен сменным защитным фильтром-крышкой, его следует визуально осмотреть на наличие признаков загрязнения и при необходимости заменить. При необходимости корпус гигрометра можно очистить влажной тканью, стараясь не намочить датчик. Электронные элементы нельзя очищать в полевых условиях, так как это может нарушить их калибровку.

Временные интервалы для обслуживания и калибровки приборов для измерения относительной влажности в полевых условиях обычно зависят от ожидаемого и требуемого уровня долгосрочной стабильности, от местоположения, а также от наличия средств и персонала. Срок службы до выхода из строя для электронных приборов для измерения относительной влажности, используемых на метеостанциях во влажном климате, обычно составляет от шести месяцев до двух и более лет. На более коротких временных интервалах часто наблюдается значительный дрейф датчика. Причиной поломки (особенно на ранних этапах) обычно является элемент датчика. Обычно его можно заменить и откалибровать гигрометр перед последующим использованием.

В некоторых случаях обслуживание электронного гигрометра в полевых условиях означает замену вышедшего из строя прибора. В других случаях полевые гигрометры заменяются (возможно, ежегодно) новыми откалиброванными приборами, а выведенный из эксплуатации прибор отправляется на обслуживание, повторную калибровку и (при удовлетворительном результате) повторную установку. Если гигрометр вышел из строя, часто ситуацию можно исправить путем замены только элемента датчика с последующей повторной калибровкой.

Для того чтобы устранить тенденцию датчиков к дрейфу, можно применять более интенсивный подход к управлению, если позволяют ресурсы. Дрейф датчика может быть оценен по возвращении из полевых условий путем сравнения с эталоном на калибровочной станции. Приборы, показывающие незначительный дрейф, можно отрегулировать, а затем откалибровать для повторного применения. Однако можно ожидать, что в дальнейшем они будут менее надежны по сравнению с новыми приборами.

Если у прибора обнаружен более значительный дрейф в полевых условиях, то его можно переоборудовать (путем покупки нового чувствительного элемента, его замены в лаборатории и калибровки обновленного прибора). Однако после нескольких установок можно ожидать ухудшения характеристик, и политика плановой замены таких гигрометров спустя определенный период времени может обеспечить более высокую общую надежность наблюдений.

Руководства по эксплуатации подавляющего большинства имеющихся в продаже гигрометров свободно доступны в сети Интернет. Как правило, это хороший источник рекомендаций по обслуживанию приборов, а производители обычно могут проконсультировать по конкретным вопросам и будут рады это сделать.

4.3 ПСИХРОМЕТР

4.3.1 Соображения общего характера

4.3.1.1 Психрометрические формулы

Обычная практика заключается в определении парциального давления водяного пара e' при условиях наблюдения из следующих полуэмпирических психрометрических формул:

$$e' = e'_w(p, t_w) - Ap(t - t_w) \quad (4.1)$$

и:

$$e' = e'_i(p, t_i) - Ap(t - t_i) \quad (4.2)$$

где e'_w — парциальное давление насыщенного водяного пара относительно воды при температуре t_w и давлении p смоченного термометра; e'_i — давление насыщенного пара относительно льда при температуре t_i и давлении p покрытого льдом термометра; p — атмосферное давление; t — температура сухого термометра; и A — психрометрический коэффициент (последний термин использовать предпочтительнее, чем термин «постоянная психрометра», который является неправильным, но иногда употребляется.)

Формулы и коэффициенты, соответствующие различным типам психрометра, рассматриваются ниже.

4.3.1.2 Спецификация психрометра

Оборудование, используемое для психрометрических наблюдений, должно, насколько это практически возможно, соответствовать следующим рекомендациям:

- а) на уровне моря и тогда, когда используются термометры тех типов, которые обычно применяются на метеорологических станциях, скорость вентиляции термометров должна быть в пределах 2,2–10 м с⁻¹. Если высота существенно отличается от уровня моря, эти предельные значения скорости воздуха должны корректироваться, и их изменение обратно пропорционально изменению плотности атмосферы;
- б) смоченный и сухой термометры должны быть защищены от воздействия любого излучения, причем предпочтительно, как минимум, двумя щитками. В психрометре с принудительной вентиляцией, таком как психрометр Ассмана, эти щитки могут быть выполнены из отполированного, неокрашенного металла и отделены от остальной части прибора изолирующими материалами. В принципе предпочтительным является термоизолирующий материал, и именно этот материал должен использоваться в психрометрах с естественной вентиляцией;

- с) в случае, когда психрометр установлен в защитной будке с жалюзи и с принудительной вентиляцией, для обоих термометров должны быть предусмотрены отдельные вентиляционные каналы. Вход в эти каналы должен быть размещен таким образом, чтобы приборы измеряли истинную температуру окружающего воздуха, а воздух должен выходить из будки таким образом, чтобы не возникало его рециркуляции;
- д) необходимо очень тщательно следить за тем, чтобы не происходило передачи значительного количества тепла от мотора вентилятора к термометрам;
- е) резервуар с водой и фитиль должны быть установлены таким образом, чтобы вода поступала на резервуар (датчик) смоченного термометра и не влияла на температуру, показываемую сухим термометром.

4.3.1.3 **Обвязка из ткани для смоченного термометра**

В смоченном термометре, как правило, присутствует фитиль из хлопковой или аналогичной ткани, тесно облегающий чувствительный элемент с тем, чтобы поддерживать на нем ровную пленку воды, которая поступает либо непосредственно, либо благодаря какой-либо форме капиллярной подачи из резервуара. Фитиль обычно имеет форму конуса и плотно облегает резервуар термометра (или сам термометр), поднимаясь, по меньшей мере, на 2 см выше резервуара (датчика) термометра, чтобы охладить большую зону и уменьшить погрешность из-за недостаточного погружения. Для смоченного термометра следует использовать дистиллированную воду.

Ткань, которая покрывает смоченный термометр, должна быть тонкой и плотной. Если поставщик предлагает фитиль, рассчитанный на размер термометров, следует использовать именно его. Перед помещением ткани на термометр ее следует тщательно промыть в водном растворе бикарбоната натрия (NaHCO_3), при концентрации 5 г на литр, и затем несколько раз прополоскать в дистиллированной воде. В качестве альтернативного варианта можно прикипятить ее в разбавленном растворе чистого детергента в воде, а затем в дистиллированной воде. При работе с чистым фитилем или обвязкой из ткани следует проявлять большую осторожность, чтобы предотвратить их загрязнение от рук и, например, использовать очищенный пинцет или чистые пластиковые перчатки, не оставляющие следов.

Очень важен надлежащий уход за смоченным термометром. Любое видимое загрязнение фитиля или обвязки из ткани для смоченного термометра следует рассматривать как абсолютное свидетельство необходимости их немедленной замены.

Помимо этого наблюдателям следует заменять обвязку из ткани и фитиль для смоченного термометра по меньшей мере один раз в неделю во всех используемых на постоянной основе психрометрах. В местах, расположенных недалеко от моря и промышленных районах эти элементы прибора следует заменять чаще. Необходимо также часто проверять, насколько хорошо поступает вода, и в случае необходимости проводить замену воды или пополнение ее запаса.

При жарких сухих условиях предпочтительно смачивать тканевую оболочку водой из пористого сосуда. При этом в результате испарения с пористой поверхности обеспечивается предварительное охлаждение воды. Сосуд следует размещать в тени, однако, не в непосредственной близости от психрометра.

4.3.1.4 **Работа со смоченным термометром при температуре ниже точки инея**

При температуре ниже точки инея работать с психрометром трудно; тем не менее, он все же используется в климатических условиях, при которых возможна такая температура. При замерзании фитиля его использование для перемещения воды из резервуара к обвязке из ткани на смоченном термометре за счет действия капилляров невозможно. При таких

условиях необходимо тщательно следить за тем, чтобы на обвязке из ткани образовывался лишь очень тонкий слой льда. При этом совершенно необходимо обеспечивать принудительную вентиляцию термометров; если вентиляция отсутствует, работа со смоченным термометром становится чрезвычайно трудной.

Термометр в аспирационных и прачевых психрометрах должен смачиваться непосредственно перед измерением. По мере возможности следует обеспечивать также, чтобы температура воды была близка к точке замерзания. Если на нижней части резервуара термометра образуется нарост льда, то его следует поместить в воду на время, достаточное, для того чтобы лед растаял.

Период времени, необходимый для того, чтобы смоченный термометр начал показывать стабильный результат после смачивания обвязки из ткани, зависит от скорости вентиляции и от реальной температуры смоченного термометра. При отсутствии вентиляции этот период времени для термометра составляет от 15 до 45 минут, в то время как для вентилируемого термометра потребуется гораздо меньшее время. Очень важно следить, чтобы образование нового слоя льда на резервуаре термометра происходило в надлежащее время. Если наблюдения на обычном психрометре проводятся каждый час, то после смачивания на ткани образуется слой льда, который, как правило, сохраняется до следующего измерения. Если интервал времени между наблюдениями превышает один час, то наблюдателю следует посещать психрометрическую будку и смачивать термометр для того, чтобы перед каждым наблюдением на резервуаре термометра образовывался свежий слой льда.

Испарение слоя льда между снятиями показаний можно предотвратить или замедлить, помещая смоченный термометр в небольшую стеклянную трубку или закрывая вентиляционное отверстие смоченного термометра между периодами измерений. В этом случае смоченный термометр не будет показывать точную температуру во время этих вмешательств. (Отметим, что последнюю операцию не следует проводить в тех случаях, когда это может привести к перегреву вентилятора.)

Смоченный термометр может показывать разную температуру в зависимости от того, что будет на смоченной ткани во время измерения — лед или переохлажденная вода. Исключение этих различий достигается следующими путями:

- a) на основе использования разных формул или таблиц для случаев, когда смоченный термометр покрыт слоем льда или пленкой переохлажденной воды. Для того чтобы определить, какую таблицу использовать, до резервуара смоченного термометра следует дотрагиваться кристаллом снега, карандашом, иглой или другим предметом сразу же после завершения наблюдения. Также полезно проверить степень блеска на поверхности резервуара смоченного термометра, если резервуар замерз. Если температура повышается, приближаясь к 0°C , а затем снова понижается, можно предположить, что вода на резервуаре смоченного термометра в срок наблюдения была переохлажденной;
- b) на основе использования формул или таблиц, подходящих для случаев, когда резервуар смоченного термометра покрыт льдом, инициируя замерзание переохлажденной воды способом, указанным в пункте (a). В целях экономии времени и обеспечения покрытия смоченного термометра льдом наблюдателю следует инициировать замерзание воды при каждом наблюдении сразу же после смачивания резервуара термометра. Наблюдая за поведением смоченного термометра при точке замерзания, обычно можно определить, покрыт резервуар льдом или переохлажденной водой. Рекомендуется, однако, инициировать замерзание воды при каждом наблюдении, когда предполагается, что температура смоченного термометра ниже 0°C , независимо от того, проводится или нет наблюдение за поведением термометра после его смачивания.

Первый метод, как правило, позволяет получить результаты быстрее, однако он требует использования двух таблиц, а это может привести к некоторой путанице.

4.3.1.5 **Общая процедура проведения наблюдений**

Для измерения температуры необходимо следовать процедурам, описанным в настоящем томе, глава 2. В дополнение к ним надо выполнять следующие требования:

- a) в случае если необходимо заменить обвязку из ткани, фитиль или воду для смоченного термометра, это следует делать с достаточной заблаговременностью до проведения наблюдения; период времени, необходимый для того, чтобы была достигнута правильная температура смоченного термометра, будет зависеть от типа психрометра;
- b) показания термометров следует считывать до ближайшей 0,1 градуса;
- c) при проведении наблюдения необходимо считывать показания с двух термометров, по мере возможности одновременно (разумно сначала снять показания сухого термометра, затем влажного и, наконец, снова сухого), и следить, чтобы к смоченному термометру поступало достаточное количество воды.

4.3.1.6 **Использование электрических термометров сопротивления**

Вместо стеклянных жидкостных термометров все чаще используются прецизионные платиновые электрические термометры сопротивления, особенно в тех случаях, когда требуется дистанционное считывание результатов и проведение измерений на постоянной основе. Необходимо, чтобы устройства и их соответствующая электроника удовлетворяли требованиям, предъявляемым к рабочим характеристикам. Эти требования подробно изложены в настоящем томе, глава 2. Особое внимание следует всегда уделять самонагреву, возникающему в электрических термометрах.

Психрометрические формулы в приложении 4.В, используемые для аспирационных психрометров Ассмана, действительны также, когда вместо стеклянных ртутных приборов используются ПТС при различных конфигурациях элементов психрометра и термометров. Формула для воды на смоченном термометре действительна также для некоторых психрометров с поперечной вентиляцией (WMO, 1989a), т. е. при которой направление потока воздуха перпендикулярно оси термометра.

4.3.1.7 **Психрометрические формулы и таблицы**

Ниже представлена в общем виде некоторые действующие принципы и практика построения психрометрических таблиц.

Температура смоченного термометра T_w для большинства приборов не идентична теоретической термодинамической температуре смоченного термометра, определение которой дано в приложении 4.А и значение которой зависит только от p , T и r (отношение смеси). Температура, измеряемая практическим смоченным термометром, зависит также от ряда параметров, находящихся под влиянием динамики передачи тепла через поверхность раздела жидкость/газ (в которой газ должен характеризоваться в понятиях составляющих его ламинарных и турбулентных слоев). Описание удовлетворительной термодинамической модели выходит за пределы содержания настоящей работы. Несоответствие между термодинамической и измеренной температурами смоченного термометра разрешается на практике посредством эмпирического определения психрометрического коэффициента A (WMO, 1992).

В целом коэффициент A зависит от конструкции психрометра (в частности, системы смоченного термометра), диаметра термометров, скорости потока воздуха, обтекающего смоченный термометр (называемой скоростью вентиляции (аспирации)), температуры и влажности воздуха. При низкой скорости вентиляции значение A существенно зависит от скорости вентиляции. Однако при скорости вентиляции, равной $3\text{--}5\text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$ и более (для термометров обычного размера), значение A становится, в сущности, независимым

от скорости вентиляции и остается практически неизменным для любых хорошо спроектированных психрометров. Значение A слабо зависит от температуры и влажности воздуха, и его зависимость от этих переменных, как правило, пренебрегают. В случае, когда смоченный термометр покрыт льдом, коэффициент A меньше, чем когда он покрыт водой.

4.3.1.8 **Источники погрешностей в психрометрии**

Следует рассмотреть следующие основные источники погрешностей:

- а) погрешности термометров. При психрометрических измерениях очень важно знать инструментальные погрешности используемых термометров для рабочего диапазона температур и проводить корректировку показаний приборов с учетом этих погрешностей еще до использования формул или таблиц влажности (психрометрических таблиц). В целом, следует предварительно выбирать термометры с минимальными погрешностями.

Любые другие ошибки определения температуры смоченного или покрытого льдом термометра, вызванные другими причинами, должны устраняться таким же образом, что и погрешности термометров.

Таблица 4.1 иллюстрирует погрешности расчета относительной влажности воздуха $\varepsilon(U)$ по показаниям смоченного или покрытого льдом термометров, инструментальные ошибки которых $\varepsilon(t_x)$ (где x — это соответственно вода при $t > 0$ °C и лед при $t < 0$ °C) равны 0,5 и 0,1 K, для относительной влажности $U = 50$ % ОВ и диапазона действительных значений температуры воздуха (при этом подразумевается, что показания сухого термометра соответствуют действительному значению температуры воздуха).

- б) коэффициенты времени отклика термометров (иногда называемые коэффициентами инерции). Для получения наивысшей точности при работе с психрометром желательно обеспечить такое положение, при котором как смоченный, так и сухой

Таблица 4.1. Значения погрешности расчета относительной влажности воздуха за счет неучета инструментальных ошибок смоченного и покрытого льдом термометров $\varepsilon(t_x)$ при $U = 50$ % ОВ

Температура воздуха, °C	Значения погрешности расчета относительной влажности $\varepsilon(U)$ в % за счет неучета инструментальных погрешностей смоченного и покрытого льдом термометров	
	$\varepsilon(t_x) = 0,5$ K	$\varepsilon(t_x) = 0,1$ K
–30	60	12
–20	27	5
–10	14	3
0	8	2
10	5	1
20	4	0,5
30	3	0,5
40	2	0,5
50	2	0

термометры имели бы примерно одинаковый коэффициент времени отклика; в случае, когда термометры имеют резервуары одинакового размера, время отклика смоченного термометра значительно меньше, чем сухого.

- c) погрешности, связанные с вентиляцией. Погрешности, связанные с недостаточной вентиляцией, могут привести к завышению влажности.
- d) погрешности, связанные с использованием неадекватных формул или таблиц влажности (см. разделы, посвященные отдельным видам психрометров). Неправильные оценки могут усугубить другие ошибки.
- e) погрешности, обусловленные чрезмерным слоем льда на резервуаре смоченного термометра. Поскольку толстый слой льда на резервуаре увеличивает время отклика термометра, следует немедленно удалять такой лед, погружая резервуар в дистиллированную воду.
- f) погрешности, обусловленные загрязнением ткани на смоченном термометре или использованием загрязненной воды. Возникновение значительных погрешностей может быть связано с присутствием веществ, изменяющих давление водяного пара. Смоченный термометр с покрывающей его тканью следует регулярно промывать в дистиллированной воде для устранения всех растворимых загрязняющих веществ. В некоторых районах эту процедуру следует выполнять чаще, чем в других, например, поблизости от моря или в районах с сильным загрязнением воздуха.
- g) погрешности, обусловленные передачей тепла от столбика жидкости термометра к резервуару смоченного термометра. Передача тепла от столбика жидкости термометра к его смоченному резервуару уменьшает психрометрическую разность и приводит к завышенным значениям влажности. Это влияние особенно проявляется при низкой относительной влажности, однако его можно сократить или избежать, если обернуть резервуар термометра тканью таким образом, чтобы верхний конец ткани был бы, по крайней мере, на 2 см выше резервуара смоченного термометра.
- h) Ошибки, связанные с радиационными эффектами: температура смоченного термометра всегда будет ниже температуры окружающей среды, а экраны для защиты от излучения не всегда полностью защищают от радиационного нагрева всех частей конструкции.

Следует отметить, что психрометры обычно дают менее точные показания при низкой относительной влажности (большие разности со смоченным термометром).

4.3.2 Психрометр Ассмана и другие аспирационные психрометры

Альтернативой традиционному (ртутному стеклянному) психрометру Ассмана является электрический аспирационный психрометр, использующий два ПТС, вместо двух ртутных стеклянных термометров. Новые конструкции аспирационных психрометров не повторяют в точности схему приборов Ассмана и обычно оснащены резервуаром для подачи воды на фитиль в течение длительного времени. В целом, при работе с любыми альтернативными конструкциями все равно требуется соблюдать меры предосторожности так же, как и при работе с приборами по типу психрометра Ассмана.

Эта смена приборов должна тщательно регистрироваться, и в течение двух или более лет необходимо проводить параллельные сравнения в соответствии с рекомендациями ВМО (ВМО, 2011b, 2015).

4.3.2.1 Описание

Аспирационный психрометр Ассмана представляет собой систему из двух термометров, помещенных вертикально друг рядом с другом в отполированных металлических оправах

с хромовым или никелевым покрытием и соединенных каналами с вентилятором. Вентилятор может приводиться в действие либо пружинным, либо электрическим двигателем. В традиционной конструкции Ассмана применялись ртутные стеклянные термометры, но в новых конструкциях в принципе можно использовать подходящие по характеристикам альтернативы (термометры сопротивления или другие типы жидкостных стеклянных термометров) с подходящим диаметром и диапазоном измерения. Один из термометров обязан плотно прилегающим к его поверхности одним слоем тонкой ткани, который перед измерениями смачивается дистиллированной водой. Ткань покрывает чувствительную часть термометра (колбу в жидкостном стеклянном термометре) и дополнительно определенную длину стержня термометра. Если в качестве смоченного термометра используется термометр сопротивления, важно, чтобы фитиль покрывал чувствительный элемент и область рядом с ним; эта область не всегда очевидна при осмотре термометра, но наблюдатель должен исходить из своего знания его внутреннего устройства.

Резервуар каждого термометра размещен внутри пары коаксиальных металлических трубок, тщательно отполированных как внутри, так и снаружи, которые защищают их от внешнего теплового излучения. Эти трубки тщательно термически изолированы друг от друга.

Проведенное под эгидой ВМО международное сравнение психрометров Ассмана из десяти стран (WMO, 1989a) показало, что хорошая согласованность между значениями температуры сухого и смоченного термометров наблюдается в психрометрах с техническими характеристиками, близкими к представленным в таблице 4.1, и со скоростью вентиляции от $2,2 \text{ м с}^{-1}$. Не все из имеющихся на рынке приборов полностью удовлетворяют этим требованиям. Подробно данный вопрос рассматривается в публикации ВМО (WMO, 1989a). Было высказано предположение, что точность психрометра Ассмана в полевых условиях может быть не хуже достижимой точности, указанной в настоящем томе, глава 1, приложение 1.A, но этот уровень точности не будет надежно достигаться, в частности, из-за возможных ошибок воздушного потока, загрязнения и радиационного теплообмена.

В приложении 4.B приведены стандартные формулы для расчета значений величин, характеризующих влажность, на основе данных измерений, проведенных при помощи психрометра Ассмана⁴, и эти формулы также используются для ряда других психрометров с принудительной вентиляцией, при отсутствии других хорошо зарекомендовавших себя альтернатив.

4.3.2.2 Процедура наблюдения

Обвязка, которая должна быть свободна от жировых и иных загрязнений, смачивается дистиллированной водой. Загрязненные или покрытые коркой фитили следует заменять. Необходимо тщательно следить за тем, чтобы между тканью и внутренней трубкой, защищающей резервуар от теплового излучения, не было воды.

При эксплуатации термометры должны, как правило, находиться в вертикальном положении, и лучше всего закрепить их на стойке. Термометры должны быть защищены от солнечного излучения. Для этого прибор ориентируется так, чтобы боковые щитки находились на одной линии с солнцем. Ручные приборы следует наклонять таким образом, чтобы входные отверстия трубок, где помещены резервуары термометров, были направлены навстречу ветру, однако при этом необходимо тщательно следить, чтобы солнечное излучение не попадало на резервуары термометров. Защита от ветра нужна в условиях очень сильных ветров, когда отказ от такой защиты негативно отразится на скорости вращения вентилятора.

Психрометр должен находиться в состоянии теплового равновесия с окружающим воздухом. При температуре воздуха, превышающей $0 \text{ }^{\circ}\text{C}$, следует выполнить после начала

⁴ Рекомендовано КПМН на ее десятой сессии (1989 г.).

вентиляции не менее трех измерений с интервалом 1 минута. При температуре ниже 0 °С необходимо ждать до тех пор, пока не закончится процесс замерзания, и обращать внимание на то, чем покрыт фитиль: водой или льдом. В ходе процессов замерзания и таяния температура смоченного термометра остается постоянной и равной 0 °С. В случае наблюдений на открытом воздухе следует, провести несколько измерений и затем взять среднее значение. Показания термометров следует снимать с точностью не менее 0,1 К.

Кратко процедуру наблюдений с использованием психрометра Ассмана можно представить в следующем виде:

- a) смочить резервуар термометра;
- b) завести вентилятор с часовым механизмом (или запустить электродвигатель);
- c) подождать две или три минуты либо до того момента, пока показания смоченного термометра не установятся;
- d) снять показания с сухого термометра;
- e) снять показания со смоченного термометра;
- f) проверить показания сухого термометра.

4.3.2.3 **Размещение и установка прибора**

Наблюдения необходимо проводить на открытом месте. Прибор следует либо подвешивать с помощью зажима и скобы на тонком шесте, либо держать в вытянутой руке, так чтобы входные отверстия трубок с резервуарами термометров были слегка наклонены навстречу ветру. При проведении обычных измерений температуры и влажности воздуха входные отверстия этих трубок должны находиться на высоте от 1,25 до 2 м над поверхностью земли.

Следует тщательно следить за тем, чтобы постороннее влияние, обусловленное присутствием самого наблюдателя или любых других близко расположенных источников тепла и водяного пара, таких как автомобили (выхлопные газы), не сказывалось на показаниях прибора.

4.3.2.4 **Калибровка**

Калибровка психрометра имеет два аспекта: калибровка термометров и калибровка прибора в целом, выполняющего функцию гигрометра. Перед калибровкой прибора следует провести техническое обслуживание (особенно фитиля и вентилятора).

Калибровку термометров рекомендуется проводить через регулярные промежутки времени в зависимости от типа и качества термометров, а также от характера обращения с термометрами или других нагрузок на них. Более подробная информация изложена в настоящем томе, глава 2.

Для термометров сопротивления калибровочные поправки могут применяться путем использования различных коэффициентов в формуле преобразования сопротивления в температуру. Если коэффициенты, относящиеся к калибровке, не применяются, то процесс калибровки используется для подтверждения точности термометров в пределах заданного допуска. Если термометры не соответствуют допуску, их следует заменить.

Для жидкостных стеклянных термометров поправки калибровки в принципе могут применяться арифметически; в противном случае процесс калибровки снова используется для подтверждения точности термометров в пределах заданного допуска. Если термометры не соответствуют допуску, их можно заменить.

После проведения температурной калибровки психрометр в целом калибруется как гигрометр, обычно по эталону относительной влажности. Таким эталоном может служить эталонный гигрометр точки росы или один или несколько эталонных термометров. Калибровка может проводиться в окружающем воздухе или в камере с контролем влажности и температуры для психрометров с дистанционным считыванием (ПТС). Настоятельно рекомендуется использовать возможность калибровки в камере при различных температурах и влажности для психрометров, в которых применяются электрические термометры.

В идеале, если возможно провести калибровку психрометра при различных условиях температуры и влажности, можно использовать ее результаты для оценки коэффициента психрометра или соответствующей функции, специфичной для данного психрометра. Функция обычно представляет собой константу плюс второй член, выражающий небольшую зависимость от температуры. Коэффициент или функция, полученная в результате калибровки, может заменить значение A в уравнении психрометра, если это можно реализовать (например, в программном обеспечении). Такой подход к выполнению калибровки обеспечивает более высокую точность, чем использование обобщенного коэффициента психрометра по умолчанию.

Если пренебречь калибровкой температуры перед калибровкой влажности, то нескорректированные значения температуры будут, как правило, давать большие ошибки в значениях влажности, чем при применении температурных поправок (или соблюдении допусков).

При калибровке психрометров обычно указывается давление, поскольку при оценке уравнения психрометра используется давление, а психрометрический эффект имеет некоторую зависимость от давления.

4.3.2.5 **Обслуживание**

Следует регулярно проверять калибровку термометров. Два термометра могут сравниваться друг с другом, когда они оба измеряют температуру сухого термометра. Система вентиляции должна проверяться регулярно, по меньшей мере, один раз в месяц или перед ее использованием, если этот интервал был превышен. Проверки термометров путем сравнения с эталонным термометром целесообразно проводить через определенные промежутки времени, например, ежегодно.

Ртутные инструменты больше не должны использоваться. Однако пока они сохраняются, ртутные столбики термометров следует проверять на наличие в них разрывов ртути, и, если таковые есть, их необходимо соединить или заменить прибор(ы).

В периоды между использованием прибор следует хранить в неотапливаемом помещении или в другом месте, защищенном от атмосферных осадков и сильного теплового излучения. Если прибор вообще не используется, то его следует хранить в помещении в прочном укладочном ящике, таком как ящик, в котором приборы поставляются производителем.

4.3.3 **Психрометр в жалюзийном метеорологическом экране (будке)**

Традиционно в качестве психрометров в жалюзийном метеорологическом экране используются стеклянные ртутные термометры. В качестве альтернативы, вместо двух стеклянных ртутных термометров применяются психрометры с двумя надлежащим образом оснащенными ПТС или два жидкостных стеклянных термометра другого типа.

Эта смена приборов должна тщательно регистрироваться, и в течение двух или более лет необходимо проводить параллельные сравнения в соответствии с рекомендациями ВМО (ВМО, 2011b, 2015).

4.3.3.1 **Описание**

Два термометра монтируются вертикально в психрометрической будке. Чувствительный элемент одного из термометров (для жидкостных стеклянных термометров это резервуар) обвязывается фитилем из хлопчатобумажной или батистовой ткани, который называют «обвязкой из ткани для смоченного термометра», и он должен плотно прилегать к чувствительной части термометра, охватывая ее и выходя за ее пределы. Если в качестве смоченного термометра используется термометр сопротивления, важно, чтобы фитиль покрывал чувствительный элемент и область рядом с ним; эта область не всегда очевидна при осмотре термометра, но наблюдатель должен исходить из своего знания его внутреннего устройства. В случае, когда для поддержания обвязки из ткани во влажном состоянии используются фитиль и резервуар с водой, резервуар предпочтительно помещать сбоку от термометра; при этом его отверстие должно быть на одном уровне с чувствительным элементом термометра или немного ниже. Фитиль следует поддерживать по возможности в вертикальном положении, и его длина должна быть такой, чтобы вода полностью и достаточно хорошо (но не с избытком) смачивала чувствительный элемент термометра при температуре примерно равной температуре смоченного термометра. Если фитиль не используется, смоченный термометр должен быть защищен от загрязнения путем помещения шарика в небольшую стеклянную трубку в периоды между снятием показаний.

Можно ожидать, что погрешности измерений по психрометру в будке могут быть значительно больше, чем приведенные в настоящем томе, глава 1, приложение 1.A, особенно при слабом ветре, если в будке нет принудительной вентиляции.

Таким образом, желательно обеспечивать для психрометров в будке принудительную вентиляцию при наличии такой возможности. Скорость потока воздуха для обоих термометров должна составлять примерно 3 м с^{-1} . Поток воздуха следует направлять поперек шариков термометров в горизонтальном направлении, а не вертикально, и он должен ослабевать таким образом, чтобы не возникало рециркуляции.

Психрометрические формулы, приведенные в п. 4.3.1.1, применимы к психрометрам в будке, однако значения психрометрических коэффициентов носят довольно неопределенный характер, и приведенные ниже общие сведения относятся к различным методам работы, сложившимся за многие годы. Если принудительная вентиляция осуществляется со скоростью $3 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$ или больше поперек шарика смоченного термометра, можно применять формулы, с психрометрическим коэффициентом, равным $6,53 \cdot 10^{-4} \text{ К}^{-1}$ для воды. При этом для смоченного термометра при температуре выше 0°C использовались значения $6,50\text{--}6,78 \cdot 10^{-4} \text{ К}^{-1}$, а при температуре ниже 0°C $5,70\text{--}6,53 \cdot 10^{-4} \text{ К}^{-1}$. Для психрометра в будке с естественной вентиляцией применялись коэффициенты в пределах $7,7\text{--}8,0 \cdot 10^{-4} \text{ К}^{-1}$ при температуре выше точки замерзания и в пределах $6,8\text{--}7,2 \cdot 10^{-4} \text{ К}^{-1}$ при температуре ниже точки замерзания, когда в будке есть хоть какое-то движение воздуха, а на практике так бывает почти всегда. Для случая, когда движение воздуха отсутствует, предлагаются значения коэффициента вплоть до $12 \cdot 10^{-4} \text{ К}^{-1}$ для воды и $10,6 \cdot 10^{-4} \text{ К}^{-1}$ для льда.

Как и для всех остальных типов психрометров, наилучшим способом определить психрометрический коэффициент или функцию является калибровка прибора, как это описано выше в п. 4.3.2.4, хотя для психрометров в будке сделать это не так просто, как для психрометров других типов.

4.2.3.2 **Процедура наблюдений**

Процедуры, описанные в п. 4.3.1.5, применимы к психрометру в будке.

В случае, когда используется смоченный термометр с естественной вентиляцией и при условии, что температура воды в резервуаре примерно равна температуре окружающего воздуха, стабильное значение температуры смоченного термометра установится

приблизительно через 15 минут после новой обвязки его тканью; если температура воды значительно отличается от температуры окружающего воздуха, для получения правильного значения может потребоваться и 30 минут.

4.3.3.3 **Размещение и установка прибора**

Требования к размещению и установке психрометрической будки описаны в настоящем томе, глава 2.

4.3.3.4 **Калибровка**

Принципы калибровки психрометра в будке в целом аналогичны принципам калибровки психрометра Ассмана или другого аспирационного психрометра. Однако если переместить психрометр в будке в камеру искусственного климата или в другие лабораторные условия, то вряд ли будет соответствовать условиям нормальной эксплуатации, а при калибровке на месте, вероятно, не будут обеспечены различные условия температуры и влажности.

Психрометрический коэффициент, соответствующий конкретной конфигурации будки, форме резервуара смоченного термометра и условиям вентиляции, может быть определен путем сравнения с подходящим рабочим или сравнительным эталоном, как это описано для психрометров Ассмана в п. 4.3.2.4. Однако для этого потребуются большой набор данных (в идеале в камере с контролем влажности и температуры), и можно ожидать значительного разброса в данных. Для такого базового типа инструментов эта оценка обычно не проводится, и в таких случаях нет достаточных оснований для отступления от использования значений, установленных национальными центрами.

4.3.3.5 **Обслуживание**

Следует регулярно проверять калибровку термометров. Два термометра могут сравниваться друг с другом, когда они оба измеряют температуру сухого термометра. Проверки термометров путем сравнения с эталонным термометром целесообразно проводить через определенные промежутки времени, например, ежегодно.

Столбики стеклянных жидкостных термометров следует проверять на наличие в них разрывов, и, если таковые есть, их необходимо соединить. В противном случае прибор(ы) следует заменить.

4.3.4 **Пращевые психрометры**

Эти приборы до сих пор используются, в основном на кораблях.

4.3.4.1 **Описание**

Небольшие пращевые психрометры переносного типа состоят из двух стеклянных жидкостных термометров, закрепленных в прочной рамке, снабженной шпинделем и ручкой, размещенной на противоположной от резервуаров термометров стороне, при помощи которой эта рамка и закрепленные в ней термометры могут быстро вращаться вокруг горизонтальной оси.

Схема расположения смоченного термометра зависит от индивидуальной конструкции пращевого психрометра. В некоторых конструкциях предусматривается защита резервуаров термометров от прямого солнечного излучения, и такие приборы предпочтительны для метеорологических измерений.

Также могут использоваться психрометрические формулы, приведенные в приложении 4.В. Вместе с тем, у этих гигрометров те же источники погрешности, что и у других психрометров, и при этом их трудно откалибровать по эталону влажности. Кроме того, необходимость прекращения аспирации для снятия показаний сама по себе является источником ошибок и приводит к вероятному завышению температуры смоченного термометра. По этим причинам измерения, полученные с помощью пращевых психрометров, обычно имеют значительную погрешность.

4.3.4.2 **Процедура наблюдений**

При наблюдениях следует руководствоваться следующими основными рекомендациями:

- a) все инструкции по обращению с аспирационными психрометрами Ассмана применимы также и к пращевым психрометрам;
- b) пращевые психрометры, не оборудованные специальными щитками для защиты резервуаров термометров от солнечного излучения, должны быть защищены от прямого солнечного излучения каким-либо другим способом;
- c) показания с термометров следует снимать немедленно после прекращения аспирации, поскольку температура смоченного термометра сразу же начинает повышаться, и термометры начинают испытывать на себе влияние солнечного излучения.

4.4 **ГИГРОМЕТР ТОЧКИ РОСЫ С ОХЛАЖДАЕМЫМ ЗЕРКАЛОМ**

4.4.1 **Общие сведения**

4.4.1.1 **Теория**

Гигрометр точки росы (или точки инея) используется для измерения температуры, при которой влажный воздух, будучи охлажденным, достигает насыщения и на твердой поверхности (в качестве которой обычно используют зеркало) можно обнаружить отложение росы (или инея). Такое отложение, как правило, определяется визуально. Принцип измерения описывается в п. 4.1.4.1.3, а также ниже.

Термодинамическая точка росы определяется для случая плоской поверхности чистой воды. На практике капли имеют искривленную поверхность, над которой давление насыщенного пара выше, чем над плоской поверхностью (это явление известно под названием эффекта Кельвина). Гидрофобные загрязняющие вещества усиливают этот эффект, в то время как хорошо растворимые вещества обладают противоположным влиянием и понижают давление насыщенного пара (эффект Рауля). Эффекты Кельвина и Рауля (которые соответственно повышают и понижают реальную точку росы) сводятся к минимуму, если в качестве критических по размеру принимаются более крупные капли. В этом случае уменьшается влияние кривизны, а благодаря снижению концентрации растворимых загрязняющих веществ уменьшается и эффект Рауля. Загрязнения сводятся к минимуму путем надлежащего ухода при эксплуатации (см. 4.4.3), а общее влияние эффектов Рауля и Кельвина учитывается при калибровке (см. 4.4.5).

4.4.1.2 **Принципы**

В случае, когда влажный воздух при температуре T , давлении p и отношении смеси r_w (или r) охлаждается, он в конечном итоге достигает точки насыщения относительно свободной поверхности воды (или относительно свободной поверхности льда), и на негигроскопичной поверхности может образоваться роса (или иней). Температура

условий насыщения называется точкой росы T_d (или точкой инея T_p). Давление насыщенного пара относительно воды e'_w (или льда e'_l) является функцией T_d (или T_p). Соответствующие уравнения выглядят следующим образом:

$$e'_w(p, T_d) = f(p) \cdot e_w(T_d) = \frac{r \cdot p}{0,62198 + r} \quad (4.3)$$

$$e'_i(p, T_f) = f(p) \cdot e_i(T_f) = \frac{r \cdot p}{0,62198 + r} \quad (4.4)$$

Гигрометр измеряет T_d или T_f . Несмотря на большой диапазон содержания влаги в тропосфере, этот прибор позволяет определить, как очень высокие, так и очень низкие концентрации.

Когда температура поверхности соответствует точке замерзания воды или ниже нее, важно определить, является ли конденсат переохлажденной жидкостью или льдом. Для заданной температуры конденсации давление пара над переохлажденной водой выше, чем над льдом.

Гигрометр с охлаждаемым зеркалом иногда используется для метеорологических измерений, а также в качестве эталонного прибора, как в полевых, так и в лабораторных условиях.

4.4.2 Описание

4.4.2.1 Устройство датчика

В наиболее широко применяемых системах используется небольшая отражающая поверхность из отполированного металла, которая охлаждается с помощью электрического устройства, основанного на термоэлектрическом эффекте Пельтье. Датчик состоит из тонкого металлического зеркала небольшого диаметра (приблизительно 5–10 мм), температура которого регулируется с помощью охлаждающего узла (и обычно нагревателя), и датчика температуры (обычно миниатюрного ПТС), смонтированного на нижней стороне зеркала. Зеркало должно обладать совокупностью таких свойств, как высокая теплопроводность, хорошая оптическая отражательная способность и коррозионная стойкость, и при этом его проницаемость для водяного пара должна быть низкой. Материалами для зеркала могут быть золото, покрытое родием серебро, хромированная медь и нержавеющая сталь.

Зеркало может быть оборудовано устройством оптического обнаружения для автоматического обнаружения загрязняющих веществ, которые могут повысить или понизить видимую точку росы (см. п. 4.4.2.2) с тем, чтобы их можно было устранить.

4.4.2.2 Устройство оптического обнаружения

Электрооптическая система используется, как правило, для обнаружения образования конденсата и передачи таких данных в качестве входных в систему автоматического регулирования температуры зеркала. На поверхность зеркала под углом примерно 55° направляется узкий луч света. В качестве источника света может использоваться лампа накаливания или СИД. В простых системах интенсивность отраженного и рассеянного вперед света определяется фотодетектором, сигнал с которого регулирует через автоматическую систему контроля работу узла охлаждения и нагревания. Зеркальная отражающая способность поверхности уменьшается по мере того, как возрастает толщина конденсата; охлаждение следует уменьшать, пока слой осажденной воды еще тонок, а уменьшение отражательной способности составляет от 5 % до 40 %. В более сложных системах используется вспомогательный фотодетектор, который дополнительно обнаруживает свет, рассеянный конденсатом; два таких детектора способны обеспечить очень точный контроль. Для усовершенствования контрольной системы может быть использовано второе, неохлаждаемое зеркало.

Наивысшая точность достигается путем регулирования температуры зеркала при таком значении, при котором количество конденсата не увеличивается и не уменьшается, однако на практике в системе автоматического регулирования будут наблюдаться колебания вокруг этого значения температуры. Время реагирования зеркала на нагревание и охлаждение оказывает определяющее влияние на амплитуду этих колебаний, и оно должно составлять 1–2 с. Скорость потока воздуха должна быть достаточно стабильной, и следует избегать ее резких изменений, чтобы поддерживать на зеркале стабильное осаждение. В некоторых случаях можно определить температуру, при которой происходит конденсация, с разрешением 1 мК и общей неопределенностью 0,1 К (при уровне доверия 95%, коэффициенте охвата $k = 2$), или более, в зависимости от погрешности калибровки, а также других факторов.

Изначальные виды гигрометров точки росы с ручным контролем температуры во многом устарели.

4.4.2.3 **Устройство регулирования температуры**

Устройство для переноса тепла с использованием термоэлектрического эффекта Пельтье простым реверсивным тепловым насосом; полярность подаваемого постоянного тока определяет поступление тепла либо к зеркалу, либо от зеркала. Это устройство присоединено к нижней части зеркала и находится с ним в хорошем тепловом контакте. Обычно используется многоступенчатое устройство с использованием термоэлектрического эффекта Пельтье, в котором для наибольшего охлаждения требуется наибольшее количество ступеней. При измерении относительно сухих газов сначала их необходимо охладить до температуры на несколько градусов ниже температуры конденсации для образования обнаруживаемой пленки капель или частиц льда.

Регулирование температуры осуществляется при помощи электрической системы авторегулирования, которая в качестве входного сигнала воспринимает сигнал от оптической детекторной подсистемы. Современные системы действуют под контролем микропроцессора.

Для контроля общей температуры в головке прибора и отвода тепла, выделяемого элементом, основанным на термоэлектрическом эффекте Пельтье, обычно предусмотрено дополнительное встроенное охлаждение. Это может быть принудительное воздушное охлаждение или система хладагента замкнутого цикла. В качестве альтернативы, в некоторых типах приборов для дополнительного контроля температуры используется двигатель Стирлинга. В более старых приборах для дополнительного охлаждения используется жидкость с низкой точкой кипения, например этанол, наряду с внешним охлаждением, но этот метод используется все реже. Кроме того, для защиты от нежелательной конденсации используется дополнительный обогрев (а в некоторых режимах - обогреваемая пробоотборная трубка).

4.4.2.4 **Система визуального отображения температуры**

Температура зеркала, измеренная электрическим термометром, прикрепленным под нижней поверхностью зеркала, выводится как точка росы определенной пробы воздуха. Коммерческие приборы, как правило, включают электрическое устройство сопряжения термометра зеркала и цифрового дисплея, однако в них могут быть также предусмотрены цифровые и аналоговые электрические выходные устройства для работы с оборудованием для регистрации данных. Для непрерывного мониторинга аналогового выхода сигнала от термометра зеркала может применяться диаграммный самописец, но этот метод используется все реже. Некоторые гигрометры обеспечивают отдельный выход для ПТС зеркала, отличный от ПТС, который используется для контроля температуры.

4.4.2.5 **Формат прибора**

Как правило, лабораторные гигрометры точки росы представляют собой стендовые или устанавливаемые в стойке приборы, которые используются с трубками для отбора проб воздуха из выбранного места. Пробоотборные трубки подогреваются, если используется в таком диапазоне температур, где присутствует риск образования конденсата.

Альтернативный формат использует головку датчика дистанционного зондирования, в которой расположен элемент, основанный на термоэлектрическом эффекте Пельтье, зеркало, оптическую систему и систему измерения температуры. В некоторых случаях головка дистанционного зондирования предназначена для проведения измерений в свободной атмосфере, без принудительной вентиляции.

4.4.2.6 **Вспомогательные системы**

Для того чтобы обеспечить возможность визуально различить капли переохлажденной воды и кристаллы льда при температуре зеркала ниже 0 °C, в прибор может быть встроен микроскоп. Некоторые приборы в целях обеспечения автоматической процедуры такого определения снабжены смонтированным на поверхности зеркала детектором, в то время как в других приборах используется метод, основанный на отражательной способности.

В системе, основанной на микропроцессоре, могут быть предусмотрены алгоритмы для пересчета и визуального отображения значений относительной влажности. В этом случае важно обеспечить, чтобы прибор точно различал конденсат в виде воды и в виде льда. Кроме того, решающее значение для получения правильных и репрезентативных значений относительной влажности будут иметь калибровка и размещение внешнего термометра. Если рассчитываются другие величины влажности, такие как объемная доля или соотношение, результат также будет зависеть от давления, которое либо измеряется, либо основывается на заданном значении.

Во многих приборах предусмотрена автоматическая процедура для сведения к минимуму последствий загрязнения. Это может быть цикл регулярного нагревания, при котором летучие загрязняющие вещества испаряются и удаляются с потоком воздуха. Во время такого цикла нагревания прибор будет либо выводить повышенные показания, либо фиксированное последнее значение до тех пор, пока не возобновятся нормальные показания. Используются также системы, предусматривающие автоматическое протирание зеркала. Там, где это возможно, качество водной или ледяной пленки как показателя чистоты можно подтвердить посредством визуального осмотра.

Для проведения метеорологических измерений и для большинства лабораторных применений необходим небольшой насос, который прогонял бы пробу воздуха через измерительную камеру. Необходимо также и регулирующее устройство, которое позволяло бы устанавливать скорость потока воздуха, совместимую со стабильным функционированием системы авторегулирования температуры зеркала, и приемлемую скорость ответной реакции на изменения влажности. Обычно этого можно добиться, используя игольчатый клапан между выходным отверстием гигрометра и насосом. В некоторых приборах предусмотрен встроенный насос. Оптимальная скорость потока воздуха зависит от влагосодержания пробы воздуха и обычно находится в пределах 0,25–1 л·мин⁻¹.

4.4.3 **Процедура наблюдения**

Для правильного функционирования гигрометра точки росы необходима надлежащая объемная скорость потока воздуха, проходящего через измерительную камеру, хотя точная скорость обычно не является критически важной. Установка игольчатого клапана для этой цели, размещаемого по ходу потока за измерительной камерой, по-видимому, будет требовать корректировки с учетом суточных колебаний температуры воздуха. Резкая корректировка потока воздуха будет кратковременно нарушать работу гигрометра.

Любые корректировки следует производить с достаточной заблаговременностью для того, чтобы достичь стабильной работы прибора прежде, чем будут сниматься показания. Необходимый для этого период времени будет зависеть от цикла регулирования каждого отдельного прибора. Следует ознакомиться с инструкциями производителя с тем, чтобы получить надлежащее представление о скорости потока воздуха, которую следует устанавливать, и о подробностях цикла регулирования конкретного прибора.

Следует часто проверять состояние зеркала; по мере необходимости зеркало следует очищать. Стабильная работа прибора необязательно означает, что зеркало является чистым. Его следует промывать дистиллированной водой и тщательно высушивать, протирая мягкой тканью или прикасаясь ватной палочкой для устранения любых растворимых загрязняющих веществ. Также вместо того, чтобы вытирать насухо, обильную каплю воды, попавшую на зеркало, можно отвести с помощью ватной палочки. Если каплю можно отвести, не оставляя следов, это служит признаком чистоты зеркала. Если визуально зеркало не выглядит чистым и на нем остались следы от попавшей воды, то следует повторить очистку. При этом необходимо проявлять осторожность с тем, чтобы не поцарапать поверхность зеркала, особенно там, где она имеет тонкое покрытие для защиты основы или где вмонтирован детектор-идентификатор льда/жидкой воды. Однако единичная царапина на поверхности, как правило, не будет нарушать работу прибора. Если воздушный фильтр не используется, следует проводить очистку, по меньшей мере, ежедневно. В том случае, когда воздушный фильтр используется, его состояние надо проверять при проведении каждого наблюдения. Наблюдателю не следует стоять слишком близко к входному отверстию для воздуха; необходимо также следить за тем, чтобы выходное отверстие не было заблокировано.

При снятии показаний при температуре 0 °C или ниже наблюдателю следует определить, является ли конденсат на зеркале переохлажденной водой или льдом. Если не предусмотрено автоматическое определение, наблюдателю следует осмотреть зеркало. Правильность работы любой автоматической системы должна время от времени проверяться.

Для самых хороших приборов границы неопределенности составляют $\pm 0,1$ К в широком диапазоне значений точки росы (от -60 °C до 50 °C). Погрешность при использовании будет зависеть от погрешности калибровки и других факторов.

4.4.4 Размещение и установка прибора

Критерии, согласно которым следует устанавливать узел датчика, аналогичны критериям для любого аспирационного гигрометра. Как правило, они менее строгие, чем для психрометра или датчика относительной влажности. Это объясняется тем, что точка росы или точка инея в пробе воздуха не подвержена влиянию изменений температуры окружающей среды при условии, что она остается все время выше точки росы. По этой причине нет необходимости в установлении метеорологической будки. Датчик следует размещать на открытом пространстве, и он может быть смонтирован на столбе внутри защитного корпуса со входным отверстием для воздуха на необходимом уровне.

Для тех гигрометров, в которых требуется обеспечить поток воздуха, проходящего через прибор, необходима система для обеспечения подачи проб воздуха. Для этого обычно используется небольшой насос, который должен вытягивать воздух из выходного отверстия измерительной камеры и отбрасывать его подальше от канала, предназначенного для притока воздуха. В некоторых случаях насос является неотъемлемой частью гигрометра. Следует избегать рециркуляции воздушного потока, поскольку при этом метод забора проб считается неправильным, хотя при стабильной работе прибора содержание водяного пара в выходном отверстии должно быть в действительности таким же, как у входного отверстия. Рециркуляции воздуха можно избежать, если размещать выходное отверстие выше входного отверстия, хотя это может оказаться неэффективным, если в этом слое атмосферы вертикальный градиент температуры воздуха отрицательный.

В случае, когда прибор постоянно работает на открытом пространстве, необходимо предусмотреть наличие воздушного фильтра. Этот фильтр не должен создавать существенных препятствий потоку воздуха, поскольку такое блокирование может привести к заметному падению давления воздуха и повлиять на температуру конденсации в измерительной камере. В качестве такого фильтра может быть использован металлокерамический фильтр, способный захватывать все частицы, за исключением мельчайших аэрозольных частиц. Его преимущество заключается в том, что он может легко прогреваться с помощью электрического элемента и таким образом поддерживаться в сухом состоянии при любых условиях. Он более прочный, чем фильтры мембранного типа, и лучше подходит для пропуска потока воздуха с относительно высокими скоростями, необходимыми при использовании метода с охлажденным зеркалом в сравнении с методом сорбции. Однако, с другой стороны, металлический фильтр может быть больше подвержен коррозии под воздействием находящихся в атмосфере загрязняющих веществ, чем некоторые мембранные фильтры.

При эксплуатации приборов, в которых требуется использовать систему отбора проб воздуха, необходимо учитывать возможные изменения давления во время отбора проб воздуха. В случае перепада давления из-за фильтра или длинной трубки пробоотборника значения точки росы могут оказаться заниженными. Если давление воздуха в зондируемом объеме над зеркалом значительно отличается от давления окружающей среды, его необходимо измерить и надлежащим образом учесть изменение температуры точки росы.

4.4.5 Калибровка и инспекция в полевых условиях

4.4.5.1 Калибровка

Гигрометр точки росы должен быть откалиброван по температуре точки росы относительно эталона точки росы, что обычно выполняется в лаборатории. Калибровка может проводиться непосредственно по первичному генератору точки росы или путем сравнения с откалиброванным и прослеживаемым гигрометром точки росы с использованием в качестве передаточной среды любого стабильного источника влажного газа, который будет одновременно отбираться обоими гигрометрами. Для применения калибровки в некоторых случаях показания гигрометра точки росы могут быть скорректированы (например, с помощью программного обеспечения). В других случаях частично или полностью осуществить калибровку можно путем настройки электроники. Как вариант, можно применять арифметические поправки, особенно в лабораторных условиях. Вне зависимости от степени применения калибровочных поправок или функций необходимо учитывать все остаточные ошибки как компоненты погрешности при использовании прибора.

При использовании какого-либо сопутствующего датчика температуры воздуха его также необходимо откалибровать. Общие указания по калибровке термометров приведены в настоящем томе, глава 2. Для использования на воздухе термометр либо калибруется на воздухе, либо, при калибровке в ванне с жидкостью, допускается соответствующая дополнительная погрешность для применения этой калибровки к измерениям на воздухе. Сюда относятся компоненты, обусловленные другим процессом самонагрева на воздухе, другим теплообменом с воздухом и радиационными эффектами.

Если гигрометр определяет относительную влажность на основе измеренных точки росы и температуры, также важно откалибровать выходной сигнал относительной влажности. Хотя, в принципе, этот выходной сигнал может быть откалиброван непосредственно по относительной влажности, обычно это зависит от температуры и поэтому здесь понадобится обширная матрица калибровочных значений. Более эффективный подход заключается в том, чтобы обеспечить оценку относительной влажности по значениям точки росы и температуры, к которым уже были применены калибровочные поправки, и это может быть сделано как полностью арифметически, так и в виде поправок, применяемых в приборе.

4.4.5.2 **Инспекция в полевых условиях**

Учитывая тот факт, что прибор с охлаждаемым зеркалом, работающий в полевых условиях, подвержен влиянию целого ряда факторов, влияющих на его эффективность, следует регулярно проводить его сравнение с эталонным прибором, например, с психрометром Ассмана, другим гигрометром с охлаждаемым зеркалом или даже прибором для измерения относительной влажности. Прибор, который постоянно эксплуатируется в полевых условиях, должен еженедельно подвергаться процедуре контрольных измерений. Следует использовать возможности для проверки функционирования прибора при точках росы и точках инея. В случае, когда температура зеркала ниже 0 °С, следует наблюдать за появлением конденсата, если это возможно, визуально, с тем чтобы определить, что представляет собой конденсат переохлажденную воду или лед.

Один из возможных методов контроля заключается в сравнении измеренных значений температуры зеркала со значениями температуры воздуха, в то время, когда система терморегулирования гигрометра отключена. Проверку лучше всего проводить, максимально открыв зеркало для доступа окружающего воздуха и сняв крышку головки. Проверку лучше всего проводить при стабильных условиях и отсутствии конденсации. В ясный солнечный день следует обеспечить затенение датчика и всасывающего патрубка и дать возможность установиться термическому равновесию. Для того чтобы проверка имела смысл, необходимо, чтобы зеркало и его корпус достигли температуры окружающей среды. Это может занять значительное время после прекращения нормальной эксплуатации.

Независимая проверка в полевых условиях устройства преобразования сигнала от термометра зеркала может быть проведена при помощи имитации такого сигнала. В случае применения ПТС могут быть использованы стандартный магазин сопротивлений или декадный магазин сопротивлений и комплект соответствующих таблиц. При этом может потребоваться также специальное устройство сопряжения имитатора с блоком регулирования гигрометра.

4.5 **ГИГРОМЕТРЫ, ОСНОВАННЫЕ НА ПОГЛОЩЕНИИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ**

Молекула воды поглощает ЭМИ в ряде диапазонов длин волн и на дискретных длинах волн, и это свойство можно использовать для определения молекулярной концентрации водяного пара в газе. Наиболее подходящими для этой цели участками электромагнитного спектра являются УФ и ИК. Соответственно эти методы часто классифицируются как оптическая гигрометрия или, что более правильно, абсорбционная электромагнитная гигрометрия.

Данный метод основан на измерении ослабления излучения в полосах поглощения водяным паром на трассе между источником излучения и детектором. Существуют два основных метода для определения степени ослабления излучения:

- а) передача излучения на двух длинах волн, на одной из которых оно активно поглощается водяным паром, а на другой — либо совсем не поглощается, либо поглощается очень слабо: в том случае, когда для генерации излучения на двух разных длинах волн используется один и тот же источник, можно иметь точные сведения о соотношении значений их интенсивности. Измеряя соотношения значений их интенсивности на принимающем устройстве, можно определить ослабление абсорбированного излучения с известной длиной волны. Наиболее часто в качестве источника при этом используется вольфрамовая лампа накаливания, оборудованная светофильтром для выделения пары длин волн в ИК диапазоне. Длина измерительной базы составляет в данном случае, как правило, более 1 м.
- б) передача излучения с фиксированной интенсивностью в узком диапазоне к прокалиброванному принимающему устройству: наиболее часто в качестве

источника излучения используется газообразный водород: спектр излучения водорода включает спектральную линию Лаймана-альфа (121,6 нм), которая совпадает с полосой поглощения водяным паром в УФ области, где наблюдается совсем незначительная абсорбция со стороны других обычных атмосферных газов. Длина измерительной базы составляет, как правило, несколько сантиметров;

Оба типа гигрометров, основанных на ослаблении электромагнитного излучения, требуют частой калибровки и больше пригодны для измерения изменений концентрации водяного пара, чем для измерения абсолютных значений. Наиболее часто такие гигрометры применяются для мониторинга происходящих с большой частотой изменений влажности, поскольку при этом методе не требуется достижения равновесия давления водяного пара с пробой. Постоянная времени оптического гигрометра составляет обычно всего несколько миллисекунд. Использование оптических гигрометров ограничивается лишь научно-исследовательской деятельностью.

4.6 ВОЛОСНОЙ ГИГРОГРАФ

4.6.1 Общие соображения

Длина волоса, как было обнаружено, является функцией, в первую очередь, относительной влажности воздуха по отношению к насыщению над водой в жидком состоянии (причем при температуре воздуха как выше, так и ниже 0 °С) и возрастает примерно на 2–2,5 % при изменении влажности от 0 % ОВ до 100 % ОВ. Скручивание волос для получения поперечного сечения в форме эллипса и растворение жировых веществ с помощью спирта приводит к увеличению соотношения между площадью поверхности и замкнутым объемом и уменьшению коэффициента инерции, что особенно важно при использовании прибора при низких температурах воздуха. Кроме того, функция реагирования волос на изменение влажности становится ближе к линейной, хотя прочность их на растяжение уменьшается. Для точных измерений предпочтительно использовать элемент из одного волоса, однако для придания элементу определенной прочности используется, как правило, жгут из волос. Химическая обработка с помощью сульфидов бария (BaS) или натрия (Na₂S) позволяет еще больше приблизить функцию ответной реакции к линейной.

Волосной гигрограф считается подходящим, хотя и не очень точным прибором для использования в таких ситуациях или в такие периоды, когда очень редки или совсем не наблюдаются экстремальные и очень низкие значения влажности. Механизм данного прибора должен быть по возможности максимально простым, даже если при этом возникает необходимость применения нелинейной шкалы; это особенно важно в промышленных районах, поскольку загрязняющие воздух вещества могут влиять на поверхность движущихся частей механизма и увеличивать трение между ними.

Скорость реагирования волосного гигрографа на изменение влажности воздуха сильно зависит от температуры воздуха. При температуре –10 °С инерция прибора примерно в три раза больше, чем при температуре 10 °С. При значениях температуры воздуха от 0 до 30 °С и относительной влажности от 20 % ОВ до 80 % ОВ хороший гигрограф за период около 3 минут должен показать 90 % скачкообразного изменения влажности.

Хороший гигрограф в надлежащем состоянии должен регистрировать относительную влажность при умеренных термических условиях с погрешностью ±3 % ОВ. При более низкой температуре погрешность будет больше.

В случаях, когда необходимо получать достоверную информацию при низких температурах, следует использовать предварительно скрученные волосы (как это описано выше).

4.6.2 Описание

Детали механизма волосного гигрографа могут различаться в зависимости от производителя. Некоторые приборы снабжены преобразователем для обеспечения электрического сигнала; при этом может также обеспечиваться функция линеаризации, так что общая реакция прибора становится линейной по отношению к изменениям относительной влажности.

В волосном гигрографе используется жгут из волос, удерживаемый под легким натяжением небольшой пружиной и соединенный с пишущим рычагом таким образом, чтобы отмечалось каждое изменение длины жгута. Перо на конце пишущего рычага находится в контакте с бумажной лентой, закрепленной вокруг металлического цилиндра, и регистрирует угловые перемещения рычага. Цилиндр вращается вокруг своей оси с постоянной скоростью, определяемой движением механических часов. Скорость вращения составляет, как правило, один оборот либо в неделю, либо в сутки. На бумажную ленту в виде шкалы нанесена ось времени, которая проходит по окружности цилиндра, и ось влажности, параллельная оси цилиндра. Цилиндр обычно устанавливают вертикально.

Механизм, связывающий пишущий рычаг со жгутом из волос, может включать в себя специально сконструированные кулачки, которые преобразуют нелинейное удлинение волос в ответ на изменения влажности в линейное угловое перемещение рычага.

В качестве волоса в волосных гигрографах может быть использовано и синтетическое волокно. При использовании человеческого волоса его обычно прежде обрабатывают (см. п. 4.6.1) с целью повышения линейности его реакции и уменьшения инерции, хотя это и приводит к уменьшению прочности на растяжение.

Пишущий рычаг и часовое устройство помещают, как правило, в футляр со стеклянными стенками, которые позволяют наблюдать за регистрацией значений влажности, не прикасаясь к самому прибору; при этом одна стенка футляра открыта с тем, чтобы волосной элемент размещался на открытом пространстве за пределами футляра. Боковые стенки футляра отделены от основания, однако стенка, противоположная волосному элементу, прикреплена к основанию при помощи шарнира. Такое устройство обеспечивает свободный доступ к часовому цилиндру и к волосному элементу. Элемент может быть защищен открытым сетчатым ограждением.

4.6.3 Процедура наблюдений

Перед снятием показаний по волосному гигрографу следует слегка постучать пальцем с тем, чтобы снять какое бы то ни было трение в механической системе. Гигрограф не следует по возможности трогать в период между сменой бумажных лент, за исключением моментов, когда делаются пометки времени.

Показания с волосного гигрографа, как правило, снимаются с округлением до 1 % ОВ. Необходимо учитывать тот факт, что прибор измеряет относительную влажность по отношению к насыщению над водой в жидком состоянии даже при температуре воздуха ниже 0 °С.

Влажность воздуха может изменяться очень быстро, и поэтому очень важно точно проставлять отметки времени на гигрографе. При этом пишущий рычаг следует перемещать только в направлении уменьшения влажности на бумажной ленте. Дело в том, что волосы в результате такого перемещения провисают, и для возвращения пера обратно в надлежащее положение используется натягивающая пружина. Однако при этом может наблюдаться эффект гистерезиса, который проявляется в невозможности для пера вернуться в его первоначальное положение.

4.6.4 **Размещение и установка**

Гигрограф следует устанавливать в психрометрической будке. Аммиак оказывает сильное негативное влияние на натуральный волос, разрушая его. В связи с этим следует избегать размещения приборов в непосредственной близости от животноводческих помещений и промышленных предприятий, использующих аммиак.

4.6.5 **Источники ошибки**

4.6.5.1 **Смещение нуля**

По невыясненным пока окончательно причинам нулевое показание гигрографа может измениться. Наиболее вероятная причина этого заключается в том, что волосы были подвергнуты избыточному натяжению. Например, волосы могут вытягиваться, если отметки времени производятся в направлении увеличения влажности на бумажной ленте или в случае заклинивания механизма гигрографа при уменьшении влажности. Нулевое показание может также изменяться, если гигрограф содержится в течение длительного времени в очень сухом воздухе, однако это изменение можно устранить, поместив прибор на достаточный период времени в атмосферу, насыщенную водяным паром.

4.6.5.2 **Погрешности, обусловленные загрязнением волоса**

Загрязнение различными видами пыли в большинстве случаев приводит к возникновению существенных погрешностей в данных наблюдений (иногда до 15 % значений ОВ). Обычно эти погрешности можно устранить или, по крайней мере, уменьшить, прочищая и промывая жгут из волос. Однако содержащиеся в пыли вещества могут разрушительно действовать на волос (см. п. 4.6.4).

4.6.5.3 **Гистерезис**

Гистерезис проявляется как в реакции волосного элемента, так и в действии регистрирующего механизма волосного гигрометра. Гистерезис в регистрирующем механизме можно уменьшить, используя жгут из волос, который позволяет увеличить силу для преодоления трения. Следует помнить, что на величину перемещения пишущего рычага влияет частично также и сила трения между пером и бумагой, и соответственно для преодоления этой силы необходимо пропорционально большее усилие со стороны волоса. Для уменьшения гистерезиса требуются, кроме того, правильная установка натяжения пружины, а также правильное функционирование всех частей всего преобразовательного механизма. Значительная часть общего трения приходится на долю основной опоры и механизма линеаризации в устройстве передачи перемещения.

Гистерезис в волосном элементе является, как правило, краткосрочным явлением, связанным с процессами абсорбции — десорбции, и перестает быть крупным источником погрешностей, как только устанавливается равновесное давление пара (о результатах продолжительного пребывания в условиях низкой влажности см. п. 4.6.5.1).

4.6.6 **Калибровка и инспекция в полевых условиях**

Снятые с гигрографа показания следует проверять настолько часто, насколько это практически целесообразно. В случае, когда смоченный и сухой термометры размещены в одной психрометрической будке с волосным гигрометром, они могут использоваться для проведения сравнения, если преобладают стабильные приемлемые условия, однако в противном случае сравнения в полевых условиях имеют ограниченную ценность, поскольку скорости ответной реакции этих приборов различны.

Точную калибровку можно осуществить лишь при использовании камеры искусственного климата и проведении сравнений с эталонными приборами.

Можно провести проверку точки 100 % ОВ (предпочтительно это сделать в помещении с постоянной температурой воздуха), обернув прибор насыщенной водой тканью (хотя нельзя получить правильные показания, если на волосном влажочувствительном элементе образуются в значительном количестве капли воды).

Характерную для помещения влажность можно получить другой (низкой) контрольной точкой относительной влажности при сравнении с эталонным аспирационным психрометром. Соответственно следует снять не одно, а целый ряд показаний.

Долгосрочная стабильность и отклонения могут быть оценены путем представления результатов сравнений с эталонным аспирационным психрометром в виде корреляционной функции.

4.6.7 Обслуживание

Наблюдателям рекомендуется содержать волосной гигрограф в чистоте.

Волос следует часто промывать, используя дистиллированную воду с помощью мягкой щетки для устранения накопившихся на нем пыли или растворимых загрязняющих веществ. Волос ни в коем случае не следует трогать пальцами. Опорные части механизма необходимо содержать в чистоте и иногда применять немного масла, используемого для часовых механизмов. На долю несущих поверхностей любого линейаризирующего механизма приходится значительная часть общего трения в соединительном устройстве. Трение можно уменьшить, полируя поверхности с помощью графита. Такую операцию можно проводить, используя кусок промокающей бумаги, натертый графитовым карандашом.

При надлежащем уходе в условиях умеренного климата и при отсутствии сильных атмосферных загрязнений волосные элементы в приборе могут сохранять свои свойства в течение нескольких лет. Повторная калибровка и подгонка потребуются лишь после замены их в приборе.

4.7 ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПРОСЛЕЖИВАЕМОСТИ И КАЛИБРОВКА

4.7.1 Принципы калибровки гигрометров

Точность, необходимая при калибровке приборов для измерения влажности, обуславливает ряд особых проблем, которые в значительной степени связаны с тем, что в пробе воздуха при нормальной температуре может содержаться относительно небольшое количество водяного пара, а также с тем, что в целом трудно изолировать газы в каком-либо контейнере, и в частности водяной пар. Упорядоченная иерархия международного единства эталонных измерений влажности начинает формироваться лишь сейчас.

В таблице 4.2 в компактной форме представлены эталонные средства измерения и воспроизведения значений влажности и их основные характеристики.

Таблица 4.2. Эталонные приборы для измерений влажности

Эталонный прибор	Точка росы		Относительная влажность (% ОВ)	
	Диапазон (°С)	Неопределенность (К)	Диапазон	Неопределенность
<i>Первичный эталон</i>				
Требование	от –60 до –15 от –15 до 40	0,3 0,1	от 5 до 100 от 5 до 100	0,2 0,2
Гравиметрический (весовой) гигрометр	от –60 до –35 от –35 до 35 от 35 до 60	0,25 0,03 0,25		
Эталонный двухтемпературный генератор влажности	от –75 до –15 от –15 до 30 от 30 до 80	0,25 0,1 0,2		
Эталонный генератор влажности на двух давлениях	от –75 до 30	0,2		
<i>Вторичный эталон</i>				
Требование	от –80 до –15 от –15 до 40	0,75 0,25	от 5 до 100	0,5
Гигрометр с охлаждаемым зеркальцем	от –60 до 40	0,15		
Контрольный психрометр			от 5 до 100	0,6
<i>Контрольный эталон</i>				
Требование	от –80 до –15 от –15 до 40	1,0 0,3	от 5 до 100	1,5
Контрольный психрометр			от 5 до 100	0,6
Гигрометр с охлаждаемым зеркальцем	от –60 до 40	0,3		
<i>Рабочий эталон</i>				
Требование	от –15 до 40	0,5	от 5 до 100	2
Психрометр Ассмана	от –10 до 25		от 40 до 90	1
Гигрометр с охлаждаемым зеркальцем	от –10 до 30	0,5		
Электрический емкостной гигрометр (для высокопроизводительных приборов, которые регулярно калибруются и тщательно обслуживаются)	от –20 до 40 от 15 до 30		от 5 до 95 от 5 до 95	2 1

4.7.2 Первичные эталоны

4.7.2.1 Гравиметрическая гигрометрия

Приборы такого типа лишь изредка используются в небольшом количестве НМУ, но ниже для информации приводится их описание.

Гравиметрический метод позволяет получить абсолютную меру содержания водяного пара в пробе воздуха, выраженную в виде доли водяного пара в воздухе: либо как отношение двух компонентов (отношение смеси), либо как доля от общего объема. Это значение выражается в массах воды и воздуха или иногда в объемных долях (или же редко в количественных долях, в молях, если можно определить состав воздуха). Это достигается путем первоначального извлечения водяного пара из пробы воздуха с использованием известной массы сушильного агента, такого как безводная пятиокись фосфора (P_2O_5) или перхлорат магния ($Mg(ClO_4)_2$). Масса водяного пара определяется путем взвешивания сушильного агента перед абсорбцией пара и после нее. Масса сухого образца определяется либо путем взвешивания, либо путем измерения его объема (если известна его плотность).

Сложность устройства, необходимого для точного проведения описанной процедуры, ограничивает применение данного метода лишь лабораторными условиями. Кроме того, для проведения точных измерений требуется значительная по объему проба воздуха, а для используемого на практике устройства необходим устойчивый поток влажного газа в течение ряда часов в зависимости от влажности с тем, чтобы извлечь достаточную массу водяного пара для точного измерения путем взвешивания. Вследствие этого применение данного метода ограничивается калибровкой лишь абсолютного сравнительного эталона. Такой прибор используется главным образом в НМУ.

4.7.2.2 Динамический эталонный генератор влажности с использованием двух давлений

Данное лабораторное устройство служит в качестве источника влажного газа, относительная влажность которого определяется абсолютным методом. Поток газа-носителя (воздуха) пропускается через камеру насыщения при давлении P_1 и затем изотермически расширяется во второй камере при более низком давлении P_2 . В обеих камерах поддерживается одна и та же температура с помощью масляной ванны, в которую они помещены. Влажность смеси водяного пара и газа находится в прямой взаимосвязи с общим давлением в каждой из двух камер, согласно закону Дальтона о парциальном давлении газов. Отношение парциального давления e' пара в камере с низким давлением к давлению насыщенного пара e'_w будет таким же, как и отношение общего давления в камере насыщения с высоким давлением к общему давлению в камере с низким давлением. Таким образом, относительная влажность U_w рассчитывается по формуле:

$$U_w = 100 \cdot e' / e'_w = 100 \cdot P_1 / P_2 \quad (4.5)$$

Это соотношение также верно для твердой фазы, если газ насыщен относительно льда при давлении P_1 :

$$U_i = 100 \cdot e' / e'_i = 100 \cdot P_1 / P_2 \quad (4.6)$$

4.7.2.3 Динамический эталонный генератор влажности с использованием двух температур

Данное лабораторное устройство обеспечивает поток увлажненного газа с температурой T_1 , температура точки росы или точки инея которого составляет T_2 . Две терморегулируемые ванны, каждая из которых оборудована теплообменниками и, кроме того, одна — камерой насыщения, содержащей либо воду, либо лед, используются для того, чтобы сначала насытить поток воздуха при температуре T_1 , а затем изобарически нагреть его до температуры T_2 . В практических конструкциях поток воздуха постоянно

циркулирует для обеспечения насыщения. Калибруемые приборы пропускают через себя часть воздуха при температуре T_2 со скоростью, значение которой невелико по сравнению со скоростью основной циркуляции.

4.7.3 Вторичные эталоны

Вторичный эталонный прибор следует хранить очень бережно и выносить из калибровочной лаборатории только для калибровки в сравнении с первичным эталоном или взаимного сравнения с другими вторичными эталонами. Вторичные эталоны могут использоваться как переходные от первичных эталонов.

Гигрометр с охлаждаемым зеркалом может использоваться в качестве вторичного эталонного прибора при контролируемых условиях температуры, влажности и давления воздуха. Для этого он должен иметь документы о калибровке от какой-либо признанной, официально уполномоченной лаборатории, в которых приведены пределы неопределенности для всего рабочего диапазона данного прибора. Эта калибровка должна выполняться напрямую по первичному эталону. Калибровку следует повторять через надлежащий интервал времени (как правило, один раз в интервале от 12 до 24 месяцев).

Общие сведения о гигрометре с охлаждаемым зеркалом приведены в п. 4.4. Этот гигрометр основан на одном из фундаментальных методов определения влажности атмосферы, и при использовании соотношения, приведенного в п. 4.4.1.2, следует принимать во внимание любые изменения давления воздуха, связанные с техникой отбора проб.

В качестве вторичных эталонов также можно использовать высокоэффективные емкостные гигрометры. Они должны быть прослеживаемыми и регулярно калиброваться по первичному эталону в лаборатории, как правило, каждые 12 месяцев.

4.7.4 Рабочие эталоны (и образцовые приборы для полевых условий)

Гигрометр с охлаждаемым зеркалом или психрометр Ассмана могут использоваться в качестве рабочего эталона для сравнений в окружающей среде в полевых или лабораторных условиях. Для этой цели необходимо проводить сравнения, по меньшей мере, на уровне сравнительного эталона и делать это не реже одного раза в 12 месяцев в стабильных условиях внутри помещения. Для рабочего эталона требуется надлежащее аспирационное устройство для отбора проб воздуха.

В качестве рабочих эталонов или образцовых приборов для полевых условий также можно использовать высокоэффективные емкостные гигрометры. Они должны быть прослеживаемыми и регулярно калиброваться по прослеживаемому эталону в лаборатории, как правило, каждые 12 месяцев. Для принятия дополнительных мер предосторожности их можно проверять на соответствие другим эталонам ежеквартально или ежемесячно.

4.7.5 Растворы солей

Раствор солей обеспечивает характерные значения относительной влажности в воздухе над ним. Значения относительной влажности зависят от химической структуры соли, концентрации соли и температуры. Существует два типа раствора солей:

- a) ненасыщенный соляной раствор, который поступает в виде ампул, создает атмосферу с определенной относительной влажностью. Эти ампулы в основном используются для пропитывания подложки в корпусе, который предназначен для того, чтобы датчик экспонировался полученной влажности;

- б) насыщенный солевой раствор, в котором некоторое количество соли остается в твердой фазе, обеспечивает стабильную концентрацию относительной влажности. В этом случае давление пара зависит только от температуры.

Для калибровки приборов для измерения относительной влажности могут быть использованы сосуды, содержащие насыщенные растворы определенных солей. Ниже перечислены наиболее часто используемые соли и значения относительной влажности над насыщенным раствором соли при температуре 25 °С:

Сульфат калия (K_2SO_4):	97,0 % ОВ
Хлорид бария ($BaCl_2$):	90,3 % ОВ
Хлорид натрия ($NaCl$):	75,3 % ОВ
Нитрат магния ($Mg(NO_3)_2$):	52,9 % ОВ
Хлорид магния ($MgCl$):	33,0 % ОВ
Хлорид кальция ($CaCl_2$):	29,0 % ОВ
Хлорид лития ($LiCl$):	11,1 % ОВ

Сульфат калия и хлорид лития представляют собой подходящие насыщенные солевые растворы и обеспечивают простые и расширенные диапазоны относительной влажности среды при 11 % ОВ и 97 % ОВ.

Важно, чтобы площадь поверхности раствора была достаточно велика по сравнению с площадью влажочувствительного элемента датчика и находящимся над раствором объемом воздуха, изолированным от внешней среды, с тем чтобы можно было быстро достичь равновесия; при этом для проверяемого датчика требуется непроницаемое для внешнего воздуха входное отверстие. Температуру сосуда следует измерять и поддерживать постоянной, поскольку для большинства солей существует значительная температурная зависимость равновесного значения относительной влажности над поверхностью насыщенного водного раствора соответствующей соли. Однородность относительной влажности над растворами улучшается при перемешивании воздуха вентилятором в герметичном объеме.

При использовании насыщенных растворов солей следует проявлять осторожность. Работающий с этими растворами персонал должен быть осведомлен о степени токсичности и коррозионной активности этих растворов. Использование перечисленных выше солей довольно безопасно, однако важно избегать их контактов с кожей, их проглатывания и попадания в глаза. Эти соли следует всегда хранить в безопасной и тщательно промаркированной таре, на которой должны быть подробно указаны все возможные последствия неосторожного обращения с ними. Необходимо проявлять осторожность при растворении кристаллов хлорида кальция в воде, поскольку при этом выделяется много тепла. Более подробные сведения об опасности при обращении с этими химическими веществами изложены в п. 4.8.3.

Насыщенные солевые растворы обеспечивают практический метод регулирования гигрометров определённого типа (емкостных). Однако для целей калибровки следует вместе с этим использовать прослеживаемый эталонный прибор для измерения относительной влажности в герметичном объеме над насыщенными солевыми растворами.

4.7.6 Методы калибровки

4.7.6.1 Замечания общего характера

Калибровка по влажности обычно выполняется путем сравнения прибора с калиброванным эталоном влажности в условиях подходящей влажности.

Среда для калибровки влажности чаще всего создается с помощью генератора влажности или камеры с регулируемой влажностью (и температурой).

В качестве эталона в лабораториях НМГС используются генератор влажности, прецизионный гигрометр с охлаждаемым зеркалом, психрометр с тщательно продуманной конструкцией или высокоэффективный емкостной гигрометр.

4.7.6.2 Лабораторная калибровка

Лабораторная калибровка, необходимая для поддержания требуемой точности, производится следующим образом:

- a) метод калибровки: при калибровке гигрометра в качестве эталона используется либо генератор влажности, либо гигрометр:
 - i) использование генератора влажности в качестве эталона: гигрометр, подлежащий калибровке, помещается в камеру генератора влажности, или, как вариант, влажный воздух, генерируемый генератором влажности, подводится к гигрометру, подлежащему калибровке. Затем значение влажности, отображаемое генератором влажности, сравнивается со значением показаний калибруемого гигрометра;
 - ii) использование гигрометра в качестве эталона: значение влажности, показываемое калибруемым гигрометром, сравнивается со эталонным гигрометром, при этом оба гигрометра помещаются в камеру генератора влажности, или, как вариант, влажный воздух, подаваемый генератором влажности, подводится к обоим гигрометрам.
- b) метод генерирования влажности: основные способы генерирования влажности заключаются в следующем:
 - i) двухуровневый генератор давления;
 - ii) двухуровневый генератор температуры;
 - iii) двухуровневый генератор давления и температуры;
 - iv) генератор смешанного потока;
 - v) раствор соли;
 - vi) камера влажности;
- c) образцовые и эталонные приборы: для лабораторной калибровки образцовых и эталонных приборов требуются прецизионный генератор влажности и подходящий переносной эталонный гигрометр. Генераторы влажности с использованием двух значений температуры и двух значений давления могут обеспечить достаточно контролируемый поток воздуха при заранее определенной температуре воздуха и точке росы. Калибровку следует проводить, по меньшей мере, каждые 12 месяцев и для полного диапазона применений данного прибора в качестве образца. Калибровка термометра зеркала и системы визуального отображения температуры может проводиться независимо, по меньшей мере, один раз в 12 месяцев;

- d) используемые в полевых и рабочих условиях эталонные приборы: лабораторная калибровка используемых в полевых и рабочих условиях эталонных приборов должна проводиться на той же самой регулярной основе, что и для рабочих термометров. Для этой цели блок датчика с охлаждаемым зеркалом может рассматриваться отдельно от блока управления. Термометр зеркала тогда может проходить автономную калибровку, а блок управления можно калибровать на той же самой регулярной основе, что и другие элементы прецизионного электронного оборудования. Калибровка используемого в полевых условиях прибора в генераторе влажности не является строго обязательной, если его компоненты были прокалиброваны отдельно, как это описано выше.

Правильность работы прибора может быть проверена в стабильных условиях в помещении путем сравнения с образцовым прибором, таким как эталонный гигрометр с охлаждаемым зеркалом или психрометр Ассмана. В том случае, когда в используемый в полевых условиях прибор встроен детектор льда, следует проверять правильность работы и этой системы.

4.7.6.3 *Полевая калибровка*

Все приборы для измерения влажности, эксплуатируемые в полевых условиях, нуждаются в регулярной калибровке. В зависимости от приборов калибровка проводится только в полевых условиях, только в лаборатории или, в качестве альтернативы, как в лаборатории, так и в полевых условиях.

В случае психрометров и гигрометров точки росы, в которых используется измерительный преобразователь температуры, состояние калибровки этого элемента может проверяться каждый раз, когда проводится регулярная установленная процедура обслуживания. Сравнения с рабочим эталоном, таким как психрометр Ассмана, следует проводить через четко установленные промежутки времени.

Преимущество использования аспирационного психрометра эталонного типа, такого как психрометр Ассмана, в качестве рабочего эталона заключается в том, что путем сравнения показаний смоченного и сухого термометров можно проверить безошибочность его собственной работы и что от хорошо работающего вентилятора можно ожидать надлежащей аспирации. Эталонный прибор должен и сам проходить калибровку через установленные для его типа интервалы времени.

На практике поверка в полевых условиях обычно производится при помощи хорошо сконструированных аспирационных психрометров и приборов для изменения точки росы или емкостных гигрометров в качестве рабочих эталонов. Эти специальные виды эталонов путем тщательных процедур должны быть откалиброваны по эталонам более высокого уровня. Любой прибор, используемый в качестве эталона, должен быть индивидуально прокалиброван по всем параметрам, связанным с расчетом влажности (температура воздуха, температура смоченного термометра, точка росы и т. д.). Должны быть учтены также и другие факторы, влияющие на работу этих приборов, такие как скорость воздушного потока.

Насыщенные растворы солей применяются при работе с такими приборами для измерения влажности, для которых необходим лишь небольшой объем воздуха. При этом требуется очень стабильная температура окружающей среды, поэтому нет полной уверенности в надежности таких приборов при их использовании в полевых условиях. Это ограничение можно преодолеть за счет тщательного сопоставления с рабочим эталоном над насыщенными солевыми растворами. Этот метод также может применяться в лаборатории для приборов для измерения влажности, эксплуатируемых в полевых условиях.

В случае использования растворов солей для контрольных целей следует иметь в виду, что номинальное значение влажности, приписываемое тому или иному раствору, не связано с каким-либо первичным эталоном.

Другой вариант заключается в том, чтобы создать несколько точек с конкретными показателями влажности с помощью портативного генератора влажности в полевых условиях и откалибровать с помощью рабочего эталонного гигрометра.

4.8 ПОСТОЯННЫЕ ВРЕМЕНИ, ЗАЩИТНЫЕ ФИЛЬТРЫ И БЕЗОПАСНОСТЬ

4.8.1 Постоянные времени датчиков влажности

Определение постоянной времени для какого-либо датчика влажности подразумевает, что ответная реакция датчика на ступенчатое изменение влажности соответствует известной функции. В общепринятой практике это период времени, необходимый для того, чтобы результат измерения датчиком достиг 63,2 % ($1/e$) ступенчатого изменения измеряемой величины (в данном случае влажности); при этом предполагается, что датчик обладает ответной реакцией первого порядка на изменение измеряемой величины (а именно, скорость изменения результатов измерения пропорциональна разности между результатом измерения и измеряемой величиной). При этом можно предположить, что 99,3 % изменения произойдет после периода продолжительностью в пять постоянных времени.

В таблице 4.3 приведены значения постоянной времени $1/e$, характерные для различных типов датчиков влажности.

4.8.2 Защитные фильтры

Защитный фильтр используется, как правило, для защиты датчика влажности от загрязняющих веществ, наличие которых может негативно сказаться на его работе. В тех случаях, когда датчик не подвергается принудительной вентиляции, использование фильтра увеличивает постоянную времени датчика, поскольку фильтр препятствует общему перемещению воздуха, и остается только полагаться на молекулярную диффузию сквозь фильтрующий материал. Хотя теоретически диффузия водяного пара сквозь некоторые материалы, в частности, изготовленные из целлюлозы, происходит быстрее, чем через воздух, на практике наибольшая скорость диффузии достигается при помощи

Таблица 4.3. Постоянные времени датчиков влажности

При 85 % относительной влажности	Постоянная времени (для $1/e$), с		
Тип датчика	20 °C	0 °C	–20 °C
Обычный человеческий волос	32	75	440
Прокатанный волос	10	10	12
Электроемкостный	1–10	1–10	1–10
Электрорезистивный	1–10	—	—
Психрометр Ассмана	30–50	30–50	30–50
Конденсационные гигрометры			
Электролитические гигрометры			
Оптический гигрометр	< 0,01	< 0,01	< 0,01

Примечание: обычно соотношение первого порядка не очень хорошо выполняется в сорбционных датчиках, поскольку воздействующий на равновесие пара фактор — локальный градиент давления пара — зависит от перемещения молекул водяного пара внутри структуры твердотельного влагочувствительного элемента. В общем, отклик первого порядка будет наиболее четко проявляться в тех датчиках, которые имеют тонкий влагочувствительный элемент.

пористых гидрофобных мембран. Размер пор должен быть довольно небольшим с тем, чтобы улавливать вредные аэрозольные частицы (в среде над поверхностью моря могут присутствовать в значительном количестве частицы морской соли диаметром до 0,1 мкм), а пористость — достаточной для обеспечения адекватной скорости диффузии.

Размеры фильтра, как и его пористость, влияют на общую скорость диффузии. Диффузия возрастает в результате аспирации, однако следует помнить, что этот метод основывается на поддержании низкого давления воздуха на чувствительной стороне фильтра, а это может оказать значительное влияние на результаты измерения.

Невентилируемые датчики необходимо, как правило, защищать с использованием гидрофобного инертного материала. Для этой цели в различных ситуациях использовались полимерные мембраны с высокой пористостью, изготовленные из экспандированного политетрафторэтилена и которые оказались довольно прочными.

Можно использовать и металлокерамические фильтры, однако их следует нагревать во избежание проблем с конденсацией внутри материала. Это, как правило, не подходит для датчиков относительной влажности, однако приемлемо для датчиков точки росы. Металлокерамические фильтры являются прочными и хорошо подходят для применений с аспирацией, что позволяет использовать фильтры с большой площадью поверхности и соответственно с приемлемо небольшим перепадом давления.

В тех случаях, когда за счет искусственной аспирации диффузию не удастся усилить, следует обращать внимание на соотношение между площадью поверхности фильтра и объемом воздуха, который в виде пробы поступает к датчику. В случае типичного сорбционного датчика, включающего плоскую подложку, плоская мембрана, размещенная близко к поверхности датчика, обеспечивает оптимальную конфигурацию. В случае цилиндрической поверхности датчика приемлемым является цилиндрический фильтр.

4.8.3 **Безопасность**

При измерениях влажности достаточно широко используются химические вещества. Свойства таких веществ должны быть хорошо известны работающему с ними персоналу. Все химические вещества следует держать в безопасной таре с четкими этикетками и хранить в надлежащих условиях. Местными властями могут предписываться правила, касающиеся использования токсических веществ.

Необходимо внимательно ознакомиться с паспортом безопасности, который также называют паспортом безопасности материала, и понять содержащуюся в нем информацию перед тем, как приступать к работе с химическими веществами. Этот обязательный документ, который предоставляется производителем для каждого химического вещества или соли, содержит всю необходимую информацию о составе, свойствах, потенциальной опасности, мерах безопасности, обращении и хранении данного химического вещества.

При измерениях влажности широко используются насыщенные солевые растворы. Ниже приводятся краткие рекомендации относительно безопасного использования некоторых наиболее часто применяемых солей:

- a) хлорид бария (BaCl_2): вещество в виде бесцветных кристаллов; легко растворяется в воде; устойчивое, но при пожаре может испускать токсичный дым; никаких опасных реакций с водой, кислотами, основаниями, окислителями или горючими веществами; при проглатывании возникает тошнота, рвота, боли в животе и диарея; опасно при вдыхании в виде пыли, при контакте с кожей; раздражает глаза; при контакте обильно промывать водой, а в случае проглатывания обращаться за медицинской помощью;
- b) хлорид кальция (CaCl_2): вещество в виде бесцветных кристаллов, поглощающее влагу из воздуха; легко растворяется в воде, причем растворение идет с большим выделением тепла; инициирует экзотермическую полимеризацию метилвинилового эфира; может реагировать с цинком, высвобождая водород; никаких опасных

реакций с кислотами, основаниями, окислителями или горючими веществами; оказывает раздражающее действие на кожу, глаза и систему дыхания; проглатывание вызывает раздражение желудочно-кишечного тракта; проглатывание большого количества может привести к гиперкальциемии, обезвоживанию организма и повреждению почек; при необходимости промывать обильно водой и обращаться за медицинской помощью;

- c) хлорид лития (LiCl): вещество в виде бесцветных кристаллов; устойчивое, если хранится в сухих условиях; легко растворяется в воде; при пожаре испускает токсичный дым; проглатывание может повлиять на ионный баланс крови и привести к анорексии, диарее, рвоте, головокружению и нарушениям работы центральной нервной системы; если прием натрия недостаточен, может наступить повреждение почек (необходимо давать пострадавшему много воды и обратиться за медицинской помощью); никаких опасных реакций с водой, кислотами, основаниями, окислителями или горючими веществами;
- d) нитрат магния ($\text{Mg}(\text{NO}_3)_2$): вещество в виде бесцветных кристаллов; легко впитывает влагу; легко растворяется в воде; может воспламенить горючий материал; может очень активно реагировать с восстанавливающими материалами, может самопроизвольно разложиться, превратившись в диметилформамид; при пожаре может испускать токсичный дым (бороться с огнем следует при помощи водяной струи); проглатывание большого количества может привести к фатальному исходу (пострадавшему следует давать много воды и обратиться за медицинской помощью); может оказывать раздражающее действие на кожу и глаза (промывать водой);
- e) нитрат калия (KNO_3): вещество в виде белых кристаллов или кристаллического порошка; легко растворяется в воде; устойчиво, однако при пожаре может выделять ядовитый дым (бороться с огнем следует при помощи водяной струи); проглатывание большого количества может привести к рвоте, однако это вещество быстро выделяется с мочой (пострадавшему следует давать много воды); может вызвать раздражение глаз (следует промывать глаза водой); никаких опасных реакций с водой, кислотами, основаниями, окислителями или горючими веществами;
- f) хлорид натрия (NaCl): вещество в виде бесцветных кристаллов или белого порошка; легко растворяется в воде; устойчиво; никаких опасных реакций с водой, кислотами, основаниями, окислителями или горючими веществами; проглатывание большого количества может привести к диарее, тошноте, рвоте, глубокому и быстрому дыханию и судорогам (в тяжелых случаях следует обращаться за медицинской помощью).

Рекомендации относительно безопасного использования ртути приведены в настоящем томе, глава 3, приложение 3.А, 4.

ПРИЛОЖЕНИЕ 4.А. ВОДЯНОЙ ПАР В АТМОСФЕРЕ — ТЕРМИНЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

- 1) **Отношение смеси r** влажного воздуха есть отношение массы водяного пара m_v к массе сухого воздуха m_a , с которой водяной пар находится в смеси:

$$r = \frac{m_v}{m_a} \quad (4.A.1)$$

- 2) **Удельная влажность, массовая доля или содержание влаги q** влажного воздуха есть отношение массы водяного пара m_v к массе влажного воздуха $m_v + m_a$, в котором содержится водяной пар массой m_v :

$$q = \frac{m_v}{m_v + m_a} \quad (4.A.2)$$

- 3) **Концентрация пара (плотность водяного пара в смеси) или абсолютная влажность:** для смеси водяного пара и сухого воздуха концентрация пара ρ_v определяется как отношение массы пара m_v к объему V , занимаемому смесью:

$$\rho_v = \frac{m_v}{V} \quad (4.A.3)$$

- 4) **Молярная доля водяного пара пробы влажного воздуха:** молярная доля x_v водяного пара в пробе влажного воздуха, состоящей из сухого воздуха массой m_a и водяного пара массой m_v определяется отношением числа грамм-молекул водяного пара ($n_v = m_v/M_v$) к общему числу грамм-молекул пробы $n_v + n_a$, где n_a — число грамм-молекул сухого воздуха ($n_a = m_a/M_a$) испытуемого образца. В результате получаем:

$$x_v = \frac{n_v}{n_a + n_v} \quad (4.A.4)$$

или:

$$x_v = \frac{r}{0,62198 + r} \quad (4.A.5)$$

где r — отношение смеси ($r = m_v/m_a$) водяного пара пробы влажного воздуха.

- 5) **Парциальное давление** водяного пара e' во влажном воздухе при общем давлении p и при отношении смеси r определяется следующим образом:

$$e' = \frac{r}{0,62198 + r} p = x_v \cdot p \quad (4.A.6)$$

- 6) **Насыщение:** влажный воздух при данных температуре и давлении считается насыщенным, если его отношение смеси таково, что этот влажный воздух находится в состоянии безразличного равновесия относительно конденсированной фазы (жидкой или твердой) при тех же температуре и давлении, причем поверхность раздела плоская.

- 7) **Отношение смеси при насыщении:** символ r_w обозначает отношение смеси насыщенного влажного воздуха над плоской поверхностью жидкости. Символ r_i обозначает отношение смеси насыщенного влажного воздуха над плоской поверхностью твердой фазы. Понятия жидкой и твердой фазы относятся к почти чистой воде и почти чистому льду соответственно; каждая из этих субстанций содержит определенное количество растворенного воздуха.

- 8) **Давление насыщенного водяного пара в чистой фазе:** давление чистого водяного пара e_w в состоянии насыщения есть давление пара в состоянии его безразличного

равновесия над плоской поверхностью химически чистой воды при неизменных значениях температуры и давления; точно так же можно определить e_i по отношению ко льду; e_w и e_i — функции, зависящие исключительно от температуры, а именно:

$$e_w = e_w(T) \quad (4.A.7)$$

$$e_i = e_i(T) \quad (4.A.8)$$

- 9) **Молярная доля водяного пара во влажном воздухе, насыщенном относительно воды:** молярная доля водяного пара, насыщенного по отношению к воде при давлении p и температуре T , есть молярная доля x_{vw} водяного пара пробы влажного воздуха при тех же температуре и давлении, которая находится в устойчивом равновесии над плоской поверхностью воды, содержащей некоторое количество растворенного воздуха, соответствующее состоянию равновесия. Подобным образом через x_{vi} обозначена молярная доля водяного пара, насыщенного относительно плоской поверхности льда и содержащего соответственно равновесное количество растворенного воздуха.

- 10) **Давление насыщенного водяного пара влажного воздуха:** давление насыщенного пара e'_w во влажном воздухе относительно воды при давлении p и температуре T определяется по следующей формуле:

$$e'_w = \frac{r_w}{0,62198 + r_w} p = x_{vw} \cdot p \quad (4.A.9)$$

Подобным образом давление насыщенного пара во влажном воздухе относительно льда e'_i при давлении p и температуре T определяется по формуле:

$$e'_i = \frac{r_i}{0,62198 + r_i} p = x_{vi} \cdot p \quad (4.A.10)$$

- 11) **Соотношение между давлением насыщенного пара в чистой фазе и во влажном воздухе:** в метеорологическом диапазоне изменения атмосферного давления и температуры справедливы следующие равенства при ошибке не более 0,5 %:

$$e'_w = e_w \quad (4.A.11)$$

$$e'_i = e_i \quad (4.A.12)$$

- 12) **Термодинамическая температура точки росы T_d** влажного воздуха при давлении p и отношении смеси r есть температура, при которой отношение смеси насыщения r_w влажного воздуха, насыщенного по отношению к поверхности воды при том же давлении, равно данному отношению смеси r .

- 13) **Термодинамическая температура точки инея T_f** влажного воздуха при давлении p и отношении смеси r есть температура, при которой отношение смеси насыщения r_i влажного воздуха, насыщенного по отношению к поверхности льда при том же давлении, равно данному отношению смеси r .

- 14) **Температуры точки росы и точки инея,** определенные указанным образом, связаны с отношением смеси r и давлением p следующими уравнениями:

$$e'_w(p, T_d) = f(p) \cdot e_w(T_d) = x_v \cdot p = \frac{r \cdot p}{0,62198 + r} \quad (4.A.13)$$

$$e'_i(p, T_f) = f(p) \cdot e_i(T_f) = x_v \cdot p = \frac{r \cdot p}{0,62198 + r} \quad (4.A.14)$$

- 15)¹ **Относительная влажность воздуха U_w по отношению к воде влажного воздуха** при давлении p и температуре T есть процентное отношение молярной доли водяного

¹ Уравнения 4.A.15 и 4.A.17 не применяются для влажного воздуха, когда давление p меньше, чем давление насыщенного пара относительно чистой воды и льда, соответственно при температуре T .

пара x_v к молярной доле пара x_{vw} которая имела бы во влажном воздухе, если бы он был насыщен по отношению к воде при тех же значениях давления p и температуры T . Таким образом:

$$U_w = 100 \left(\frac{x_v}{x_{vw}} \right)_{p,T} = 100 \left(\frac{px_v}{px_{vw}} \right)_{p,T} = 100 \left(\frac{e'}{e'_w} \right)_{p,T} \quad (4.A.15)$$

где индексы p, T указывают, что каждый член уравнения соответствует идентичным условиям в отношении давления и температуры. Последнее выражение формально подобно классическому определению, основанному на положении закона Дальтона о парциальном давлении.

U_w также связано с отношением смеси r следующим образом:

$$U_w = 100 \frac{r}{r_w} \cdot \frac{0,621\,98 + r_w}{0,621\,98 + r} \quad (4.A.16)$$

где r_w — отношение смеси насыщения при давлении и температуре влажного воздуха.

- 16)¹ **Относительная влажность воздуха U_i по отношению ко льду влажного воздуха** при давлении p и температуре T есть процентное отношение молярной доли водяного пара x_v к молярной доле пара x_{vi} которая содержалась бы в воздухе, если бы он был насыщен по отношению ко льду при тех же значениях давления p и температуры T . В соответствии с уравнением, приведенным в пункте 15, получаем:

$$U_i = 100 \left(\frac{x_v}{x_{vi}} \right)_{p,T} = 100 \left(\frac{px_v}{px_{vi}} \right)_{p,T} = 100 \left(\frac{e'}{e'_i} \right)_{p,T} \quad (4.A.17)$$

- 17) **Относительная влажность при значениях температуры ниже 0°C** должна оцениваться по отношению к воде. Такая процедура имеет следующие преимущества:
- a) большинство гигрометров определяет относительную влажность по отношению к воде при всех значениях температуры;
 - b) большинство облаков при температуре ниже 0°C состоят из воды или преимущественно из воды;
 - c) относительная влажность, превышающая 100 % ОВ, как правило, не наблюдается; это особенно важно для синоптических сводок погоды, поскольку атмосфера часто перенасыщена по отношению ко льду при значениях температуры ниже 0°C ;
 - d) большая часть существующего массива данных об относительной влажности при значениях температуры ниже 0°C содержит значения, определенные при насыщении по отношению к воде.
- 18) **Термодинамическая температура смоченного термометра во влажном воздухе** при давлении p , температуре T и отношении смеси r есть температура T_w , которую имел бы влажный воздух, если его адиабатически привести к насыщению при давлении p посредством испарения воды в жидком состоянии при тех же давлении p и температуре T_w и в которой содержится некоторое количество растворенного воздуха, соответствующее состоянию равновесия с насыщенным воздухом при тех же давлении и температуре. Значение T_w определяется по уравнению:

$$h(p, T, r) + [r_w(p, T_w) - r] h_w(p, T_w) = h(p, T_w, r_w(p, T_w)) \quad (4.A.18)$$

где $r_w(p, T_w)$ — отношение смеси насыщенного влажного воздуха при давлении p и температуре T_w ; $h_w(p, T_w)$ — энтальпия² 1 грамма чистой воды при давлении p и

² Энтальпия системы в состоянии равновесия при давлении p и температуре T определяется как $E + pV$, где E — внутренняя энергия системы, а V — ее объем. Сумма энтальпий фаз закрытой системы сохраняется в адиабатических изобарических процессах.

температуре T_w ; $h(p, T, r)$ — энтальпия $1 + r_w$ граммов влажного воздуха, состоящего из 1 грамма сухого воздуха и r граммов водяного пара, при давлении p и температуре T ; и $h(p, T_w, r_w(p, T_w))$ — энтальпия $1 + r_w$ граммов насыщенного воздуха, состоящего из 1 грамма сухого воздуха и r_w граммов водяного пара, при давлении p и температуре T_w . (Это функция исключительно p и T_w и может быть обозначена соответственно как $h_{sw}(p, T_w)$.)

Если воздух и водяной пар рассматриваются как идеальные газы с постоянной удельной теплотой, то приводимое выше уравнение принимает вид:

$$T - T_w = \frac{[r_w(p, T_w) - r] L_v(T_w)}{c_{pa} + r c_{pv}} \quad (4.A.19)$$

где $L_v(T_w)$ — теплота парообразования воды при температуре T_w , c_{pa} — удельная теплоемкость сухого воздуха при постоянном давлении; и c_{pv} — удельная теплоемкость водяного пара при постоянном давлении.

Примечание: термодинамическая температура смоченного термометра, как она определена здесь, в течение некоторого времени называлась инженерами по кондиционированию воздуха «температурой адиабатического насыщения».

- 19) **Термодинамическая температура смоченного термометра, покрытого льдом, во влажном воздухе** при давлении p , температуре T и отношении смеси r есть температура T_i , при которой чистый лед при давлении p должен испаряться во влажный воздух, чтобы адиабатически привести его к состоянию насыщения при давлении p и температуре T_i . Насыщение определяется по отношению ко льду. Значение T_i находится из уравнения:

$$h(p, T, r) + [r_i(p, T_i) - r] h_i(p, T_i) = h(p, T_i, r_i(p, T_i)) \quad (4.A.20)$$

где $r_i(p, T_i)$ — отношение смеси насыщенного влажного воздуха при давлении p и температуре T_i ; $h_i(p, T_i)$ — энтальпия 1 грамма чистого льда при давлении p и температуре T_i ; $h(p, T, r)$ — энтальпия $1 + r$ граммов влажного воздуха, состоящего из 1 грамма сухого воздуха и r граммов водяного пара, при давлении p и температуре T ; и $h(p, T_i, r_i(p, T_i))$ — энтальпия $1 + r_i$ граммов насыщенного воздуха, состоящего из 1 грамма сухого воздуха и r_i граммов водяного пара, при давлении p и температуре T_i . (Это функция исключительно p и T_i и может быть обозначена соответственно через $h_{si}(p, T_i)$.)

Если воздух и водяной пар рассматриваются как идеальные газы с постоянной удельной теплоемкостью, приведенное выше уравнение принимает вид:

$$T - T_i = \frac{[r_i(p, T_i) - r] L_s(T_i)}{c_p + r c_{pv}} \quad (4.A.21)$$

где $L_s(T_i)$ есть теплота сублимации льда при температуре T_i .

Связь между T_w и T_i и температура смоченного водой или покрытого льдом резервуара термометра согласно показаниям отдельного психрометра — это вопрос, который должен определяться посредством тщательно контролируемого эксперимента с учетом разнообразных параметров, например вентиляции, размера резервуара и радиации.

ПРИЛОЖЕНИЕ 4.В. ФОРМУЛЫ ДЛЯ РАСЧЕТА ХАРАКТЕРИСТИК ВЛАЖНОСТИ

Эти формулы удобны для расчетов и обладают достаточной точностью для всех обычных метеорологических применений, ограниченных температурой $T > -45\text{ °C}$ для жидкой воды и $T > -65\text{ °C}$ для льда. Ниже указанных температурных порогов эти формулы не применимы.

С более точными, расширенными и подробными формулировками этих и других характеристик влажности воздуха можно ознакомиться в работе Sonntag (1990; 1994). Что касается их ограничений, то они подходят для обычных метеорологических применений с меньшим расширением температурного диапазона, и имеют особое значение для целей радиозондирования.

Давление насыщенного пара:

$$e_w(t) = 6,112 \exp [17,62 t / (243,12 + t)] \quad (4.B.1) \quad \text{Вода (от } -45\text{ °C до } 60\text{ °C) (чистая фаза)}$$

$$e'_w(p, t) = f(p) \cdot e_w(t) \quad (4.B.2) \quad \text{Влажный воздух}$$

$$e_i(t) = 6,112 \exp [22,46 t / (272,62 + t)] \quad (4.B.3) \quad \text{Лед (от } -65\text{ °C до } 0\text{ °C) (чистая фаза)}$$

$$e'_i(p, t) = f(p) \cdot e_i(t) \quad (4.B.4) \quad \text{Влажный воздух}$$

$$f(p) = 1,0016 + 3,15 \cdot 10^{-6} p - 0,074 p^{-1} \quad (4.B.5) \quad [\text{см. Примечание}]$$

Точка росы и точка инея:

$$t_d = \frac{243,12 \cdot \ln [e' / 6,112 f(p)]}{17,62 - \ln [e' / 6,112 f(p)]} \quad (4.B.6) \quad \text{Вода (от } -45\text{ °C до } 60\text{ °C)}$$

$$t_f = \frac{272,62 \cdot \ln [e' / 6,112 f(p)]}{22,46 - \ln [e' / 6,112 f(p)]} \quad (4.B.7) \quad \text{Лед (от } -65\text{ °C до } 0\text{ °C)}$$

Психрометрические формулы для психрометра Ассмана:

$$e' = e'_w(p, t_w) - 6,53 \cdot 10^{-4} \cdot (1 + 0,000\,944\,t_w) \cdot p \cdot (t - t_w) \quad (4.B.8) \quad \text{Вода}$$

$$e' = e'_i(p, t_i) - 5,75 \cdot 10^{-4} \cdot p \cdot (t - t_i) \quad (4.B.9) \quad \text{Лед}$$

Относительная влажность:

$$U = 100\, e' / e'_w(p, t) \%RH \quad (4.B.10)$$

$$U = 100\, e'_w(p, t_d) / e'_w(p, t) \%RH \quad (4.B.11)$$

Условные обозначения:

t температура воздуха (температура сухого термометра);

t_w температура смоченного термометра;

t_i температура смоченного термометра, покрытого льдом;

t_d точка росы;

- t_f точка инея;
- p давление влажного воздуха;
- $e_w(t)$ давление насыщенного водяного пара в чистой фазе относительно воды при температуре сухого термометра;
- $e_w(t_w)$ давление насыщенного водяного пара в чистой фазе относительно воды при температуре смоченного термометра;
- $e_i(t)$ давление насыщенного водяного пара в чистой фазе относительно льда при температуре сухого термометра;
- $e_i(t_i)$ давление насыщенного водяного пара в чистой фазе относительно льда при температуре смоченного термометра, покрытого льдом;
- $e'_w(t)$ давление насыщенного водяного пара влажного воздуха относительно воды при температуре сухого термометра;
- $e'_w(t_w)$ давление насыщенного водяного пара влажного воздуха относительно воды при температуре смоченного термометра;
- $e'_i(t)$ давление насыщенного водяного пара влажного воздуха относительно льда при температуре сухого термометра;
- $e'_i(t_i)$ давление насыщенного водяного пара влажного воздуха относительно льда при температуре смоченного термометра, покрытого льдом;
- U относительная влажность.

Примечание: фактически, f является функцией как давления, так и температуры, т. е. $f = f(p, t)$, как поясняется в публикации ВМО (ВМО, 1966) во введении к таблице 4.10. На практике зависимость от температуры ($\pm 0,1$ %) намного ниже, чем от давления (от 0 % до +0,6 %). Поэтому, зависимость от температуры в формуле, приведенной выше, можно опустить (см. также публикацию ВМО (ВМО, 1989а), глава 10). Тем не менее, эту формулу следует использовать только для значения давления около 1 000 гПа (т. е. для приземных наблюдений), а не для аэрологических измерений, для которых следует использовать таблицу 4.10 в публикации ВМО (ВМО, 1966).

ПРИЛОЖЕНИЕ 4.С. ИНСТРУМЕНТЫ И МЕТОДЫ, КОТОРЫЕ ИМЕЮТ ОГРАНИЧЕННОЕ ПРИМЕНЕНИЕ ИЛИ БОЛЕЕ НЕ ПРИМЕНЯЮТСЯ

1 МЕХАНИЧЕСКИЕ ИНСТРУМЕНТЫ С ПРИМЕНЕНИЕМ ОРГАНИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

1.1 Волосной гигрометр

Для измерения влажности в гигрометрах использовалось изменение длины волоса при изменении относительной влажности воздуха. Все типы волосных гигрометров больше не используются в метеорологии, за исключением волосного гигрографа, описанного в 4.6, который постепенно выводится из употребления.

1.2 Другие механические методы

Раньше для механических методов, в которых используется изменение размеров органических материалов для определения относительной влажности, применялись чувствительные элементы из тканей животных, такие как специально обработанная «пленка» (органическая мембрана, получаемая из тканей-биомембран домашних животных). Такие чувствительные элементы больше не используются.

2 КОНДЕНСАЦИОННЫЙ ГИГРОМЕТР С ПОДОГРЕВАЕМЫМ РАСТВОРОМ ХЛОРИДА ЛИТИЯ (ПОДОГРЕВАЕМЫЙ ГИГРОМЕТР ТОЧКИ РОСЫ)

2.1 Соображения общего характера

2.1.1 Принципы

Равновесное давление водяного пара над поверхностью насыщенного раствора хлорида лития является весьма низким. Вследствие этого такой раствор хлорида лития чрезвычайно гигроскопичен при типичных значениях влажности приземной атмосферы; при условии, что давление находящегося в окружающем воздухе водяного пара превышает равновесное давление пара этого раствора, водяной пар конденсируется на нем (например, при температуре 0 °С водяной пар конденсируется над плоской поверхностью насыщенного раствора хлорида лития так, что относительная влажность составляет лишь примерно 15 %).

Если нагревать данный раствор, непосредственно пропуская через него электрический ток от источника с постоянным напряжением, то можно получить термодинамически саморегулирующееся устройство. Для предотвращения поляризации раствора следует использовать переменный ток. По мере того как электропроводность понижается, уменьшается и сила тока, нагревающего раствор, и в конечном итоге достигается точка равновесия, при которой поддерживается постоянная температура. Любое охлаждение раствора ведет в результате к конденсации водяного пара, что вызывает увеличение проводимости и соответственно силы тока, нагревающего раствор, и охлаждение сменяется на обратную тенденцию. Нагревание после достижения точки равновесия приводит к испарению водяного пара до тех пор, пока последовавшее понижение проводимости не вызовет такое уменьшение электрического нагревания, что его эффект будет меньше, чем потери тепла, и за этим последует охлаждение.

Из вышесказанного следует, что существует нижний предел давления водяного пара в окружающем воздухе, которое может быть измерено таким образом при любой заданной температуре. Ниже этого предельного значения солевой раствор должен подвергаться охлаждению с тем, чтобы обеспечить конденсацию водяного пара. И тогда этот метод будет эквивалентен методу с использованием охлаждаемого зеркала. Разница заключается в том, что при использовании последнего из упомянутых методов конденсация происходит при более низкой температуре, когда достигается насыщение относительно поверхности чистой воды, а именно, при точке росы окружающего воздуха.

Рассматриваемому методу присуща некоторая степень неопределенности, поскольку существует четыре разных гидрата хлорида лития. При определенных критических температурах два из этих гидратов могут находиться в равновесии с водной фазой, и на достигнутую путем нагревания температуру равновесия оказывает влияние происходящее затем превращение гидрата. Наиболее значимые для метеорологических целей неопределенности возникают при точке росы окружающего воздуха ниже $-12\text{ }^{\circ}\text{C}$. При точке росы окружающего воздуха $-23\text{ }^{\circ}\text{C}$, потенциальная разность значений температуры равновесия, в соответствии с которыми происходят превращения одного из двух растворов гидратов, приводит в результате к погрешности в $\pm 3,5\text{ K}$ в расчетном значении точки росы.

2.1.2 **Описание**

Гигрометр точки росы измеряет температуру, при которой равновесное давление пара для насыщенного раствора хлорида лития равно давлению водяного пара в окружающем воздухе. Эмпирические уравнения превращения, основанные на данных о давлении насыщенного пара для раствора хлорида лития и для чистой воды, позволяют получить значения давления водяного пара и точки росы окружающего воздуха относительно плоской поверхности чистой воды. Диапазону значений точки росы от $-12\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ соответствуют значения температуры на элементе для определения точки росы в пределах от $17\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $71\text{ }^{\circ}\text{C}$.

2.1.3 **Датчики с прямым нагревом**

Датчик состоит из трубки или катушки и вмонтированного в нее вдоль оси термометра сопротивления. Внешняя поверхность этой трубки покрыта стекловолоконистым материалом (обычно накрученным в виде ленты вокруг и вдоль трубки), который пропитан водным раствором хлорида лития, куда иногда добавляют немного хлорида калия. Снаружи на покрытие катушки намотана бифилярная серебряная или золотая проволока с равными промежутками между витками. Два конца этой бифилярной обмотки подсоединены к источнику переменного электрического тока; как правило, в качестве источника используются обычные магистральные электрические сети (50 или 60 Гц). Степень электропроводности раствора хлорида лития определяется концентрацией растворенного вещества. Ток проходит между смежными бифилярными витками, которые действуют в качестве электродов, и через раствор. Прохождение тока нагревает раствор, что повышает его температуру.

За исключением условий, когда влажность чрезвычайно низка, давление водяного пара в окружающем воздухе будет выше, чем равновесное давление водяного пара над раствором хлорида лития при температуре окружающего воздуха, и водяной пар будет конденсироваться на растворе. По мере нагревания раствора под воздействием электрического тока температура в конце концов достигнет такого значения, выше которого равновесное давление пара превысит давление пара в окружающем воздухе, начнется испарение и концентрация раствора возрастет.

Для конкретного прибора существует рабочее значение температуры равновесия, соответствующее значению давления водяного пара в окружающем воздухе. При значениях температуры выше равновесной вследствие испарения концентрация раствора будет повышаться; в результате электрический ток и нагревание уменьшатся, и потери

тепла приведут к понижению температуры раствора. При значениях температуры ниже равновесной конденсация будет приводить к уменьшению концентрации раствора; в результате электрический ток и нагревание будут увеличиваться и вызывать повышение температуры раствора. При равновесной температуре не происходит ни испарения, ни конденсации, поскольку равновесное давление пара и давление водяного пара в окружающем воздухе равны.

На практике на измеряемое значение равновесной температуры оказывают влияние индивидуальные характеристики конструкции датчика, и оно обычно выше, чем значение, которое можно предсказать на основе данных о равновесном давлении водяного пара для насыщенного раствора хлорида лития. Тем не менее, воспроизводимость результатов достаточно хороша для того, чтобы считать возможным использование стандартной функции преобразования для всех датчиков, сконструированных по какой-либо заданной спецификации.

Сильная вентиляция отрицательно сказывается на характеристиках датчика, связанных с передачей тепла, а колебания скорости вентиляции нарушают стабильность работы прибора.

Для сведения к минимуму риска прохождения слишком сильного тока в момент включения гигрометра (поскольку сопротивление раствора при температуре окружающего воздуха является довольно низким) предусматривается наличие устройства для ограничения тока в виде маленькой лампочки, которая последовательно соединена с нагреваемым элементом. Лампочка выбирается таким образом, чтобы при нормальных рабочих токах в катушке сопротивление нити накала было бы достаточно низким для надлежащего функционирования гигрометра, в то время как рабочий ток для лампы накаливания (допустимый даже для катушки, у которой электрическое сопротивление очень небольшое) должен быть ниже значения, при котором мог бы повредиться нагревающий элемент.

Равновесное давление водяного пара для насыщенного раствора хлорида лития зависит от гидрата, находящегося в равновесии с водным раствором. В диапазоне температур раствора, соответствующих точкам росы от $-12\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $41\text{ }^{\circ}\text{C}$, обычно преобладает моногидрат. При температуре ниже $-12\text{ }^{\circ}\text{C}$ образуется дигидрат, а при температуре выше $41\text{ }^{\circ}\text{C}$ — безводный хлорид лития. Вблизи точек этих превращений работа гигрометра является нестабильной, и показания носят неопределенный характер. Однако при добавлении небольшого количества хлорида калия (KCl) нижний предел точки росы ($-12\text{ }^{\circ}\text{C}$) может быть понижен до $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$.

2.1.4 ***Датчики с косвенным нагревом***

Повышенной точности можно достичь, если нагревать раствор хлорида лития косвенным путем. Проводимость раствора измеряется между двумя платиновыми электродами и результат измерения используется для регулирования электрического тока через нагревательную спираль.

2.2 **Эксплуатация прибора**

При использовании прибора измеряется равновесная температура катушки и применяется функция преобразования для получения температуры точки росы.

Следует предотвращать воздействие каких-либо помех работе датчика, поскольку равновесная температура чувствительна к изменениям в теплоотдаче с поверхности катушки.

Прибор должен постоянно находиться под напряжением. Если прибор по каким-либо причинам охлаждается в течение некоторого времени до температуры ниже равновесной, происходит конденсация, и электролит начинает стекать.

Следует регулярно проводить верификационные измерения, используя для сравнений рабочий эталонный гигрометр. Прибор рекомендуется по мере необходимости чистить и заново пропитывать раствором хлорида лития.

В том случае, если производителем не предусмотрено устройство для ограничения тока, его следует установить. При отсутствии такого устройства в момент включения возможны высокие значения силы тока, что может привести к повреждению датчика.

2.3 Размещение и установка

Гигрометр следует размещать на открытой площадке в метеорологическом экране, который защищает его от воздействия ветра и дождя. Необходимо наличие системы для обеспечения постоянной скорости аспирации.

Тепло от гигрометра может воздействовать на другие приборы; это следует учитывать при выборе места его расположения.

На работу прибора могут оказать влияние находящиеся в атмосфере загрязняющие вещества, особенно вещества, которые диссоциируют в растворе, приводя к значительной концентрации в нем ионов.

2.4 Источники ошибки

Для измерения равновесной температуры используется электрический термометр сопротивления, и, следовательно, присутствуют обычные для этого вида термометрии источники ошибок.

Достижимая равновесная температура определяется свойствами растворенного вещества, и значительное количество загрязняющих веществ может привести к непредсказуемым последствиям.

Колебания скорости вентиляции влияют на механизмы теплообмена и, таким образом, на стабильность работы прибора. Для стабильной работы прибора необходима постоянная скорость вентиляции.

2.5 Калибровка и инспекция в полевых условиях

По меньшей мере один раз в месяц следует проводить поверку в полевых условиях путем сравнения с рабочим эталонным прибором.

Регулярно следует проводить также калибровку термометра катушки и устройства для визуального отображения температуры, как и других рабочих термометров и систем визуального отображения.

2.6 Обслуживание

Необходимо регулярно обновлять раствор хлорида лития. Такая процедура может потребоваться один раз в месяц, однако это зависит от уровня загрязнения атмосферы. При обновлении раствора следует сначала промыть катушку дистиллированной водой и затем использовать свежий раствор. В это же время следует очистить корпус прибора и метеорологический экран.

Свежий раствор можно приготовить, смешав пять весовых частей безводного хлорида лития со ста весовыми частями дистиллированной воды. Это эквивалентно смеси 1 г безводного хлорида лития и 20 мл воды.

Уход за устройством для определения температуры следует осуществлять в соответствии с рекомендациями для электрических приборов, используемых для измерений температуры воздуха, не забывая, однако, при этом о разнице в диапазоне измеряемых температур.

3 ПСИХРОМЕТР С ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫМ ПОДОГРЕВОМ ВОЗДУХА

Приборы такого типа не используются для ведения наблюдений, но ниже для информации приводится их описание.

Принцип действия такого психрометра основан на том, что содержание водяного пара в каком-то объеме воздуха не изменяется, если его нагреть. Это свойство можно использовать для целей психрометрических измерений, поскольку тогда отпадает необходимость в измерениях смоченным термометром, резервуар которого покрыт слоем льда в условиях отрицательных значений температуры воздуха.

3.1 Описание

Воздух засасывается в канал и проходит над электронагревательным элементом, а затем попадает в измерительную камеру, в которой находятся сухой и смоченный термометры и резервуар с водой. Регулирующая схема нагревательного элемента обеспечивает такое состояние, при котором температура воздуха не опускается ниже какого-либо определенного уровня, чаще всего 10 °С. Аналогичным образом поддерживается и температура воды в резервуаре. Таким образом, ни вода в резервуаре, ни вода в фитиле не замерзает, конечно, при условии, что психрометрическая разность составляет менее 10 К и обеспечивается непрерывность действия психрометра, даже если температура воздуха ниже 0 °С. При температуре выше 10 °С нагреватель может автоматически отключаться, когда психрометр возвращается к обычному функционированию.

Принцип действия электрических термометров позволяет заключить их полностью вовнутрь измерительной камеры; при этом отсутствует необходимость в визуальном снятии показаний.

Второй сухой термометр размещается на входе во всасывающий канал с тем, чтобы обеспечивать измерение температуры окружающего воздуха. Таким образом, может быть определена относительная влажность окружающего воздуха.

Скорость воздуха, который благодаря вентиляции проходит по направлению оси резервуаров психрометрических термометров, составляет примерно 3 м·с⁻¹.

3.2 Процедура наблюдений

Психрометр с предварительным подогревом воздуха может подойти для эксплуатации на АМС.

3.3 Размещение и установка

Сам прибор следует размещать вне психрометрической будки. Входное отверстие для воздуха, где измеряется температура окружающего воздуха, следует размещать внутри будки.

4 ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ГИГРОМЕТРЫ СОПРОТИВЛЕНИЯ

Большая часть главы 4, п. 4.2 об электрических емкостных гигрометрах (за исключением п. 4.2.2) также относится и к электрическим гигрометрам сопротивления.

Резистивные приборы для измерения влажности изготавливаются из химически обработанного пластикового материала, имеющего электропроводный поверхностный слой, составляющий одно целое с основой из непроводящего материала. Удельное сопротивление поверхности изменяется в зависимости от поглощения водяного пара, которое зависит от относительной влажности окружающего воздуха. Доминирующим является процесс адсорбции, а не абсорбции, поскольку чувствительной к влажности частью такого датчика является лишь поверхностный слой. В результате датчики этого типа способны быстро реагировать на изменения влажности окружающего воздуха.

В этот класс входят различные датчики электролитического типа, в которых наличие проводящих ионов в гигроскопичном электролите является функцией количества адсорбированного водяного пара. Электролит может иметь различную физическую форму: это может быть жидкий или гелиевый раствор либо ионообменная смола. Измерение изменения полного сопротивления переменному току, предпочтительней чем постоянному; такой выбор делается для того, чтобы избежать поляризации электролита. При этом можно использовать низкочастотное возбуждение, принимая во внимание, что должно быть измерено сопротивление постоянному току и, следовательно, можно применять достаточно длинные соединительные провода между датчиком и его электрическим интерфейсом.

СПРАВОЧНАЯ И ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА

- Всемирная метеорологическая организация, 1966: *Международные метеорологические таблицы* (подгот. С. Летестю) (ВМО-№ 188, ТР. 94), изд. 1975 г. Женева.
- , 2011b: *Руководство по климатологической практике* (ВМО-№ 100). Женева.
- , 2015 (обновлено в 2019 г.): *Наставление по Интегрированной глобальной системе наблюдений ВМО* (ВМО-№ 1160). Женева.
- Anderson, P.S., 1995: Mechanism for the behavior of hydroactive materials used in humidity sensors. *Journal of Atmospheric Oceanic Technology*, 12:662–667.
- Bell, S.A., P.A. Carroll, S.L. Beardmore, C. England and N. Mander, 2017: A methodology for study of in-service drift of meteorological humidity sensors. *Metrologia*, 54(3):S63.
- Bindon, H.H., 1965: A critical review of tables and charts used in psychrometry. In: *Humidity and Moisture* (A. Wexler, ed.). New York, Reinhold, 1:3–15.
- British Standard, 2002: *Humidity terms definitions and formulae*. BS 1339 – Part 1.
- British Standard, 2004: *Guide to the measurement of humidity*. BS 1339 – Part 3.
- Burt, S., 2012: *The Weather Observer's Handbook*. Cambridge University Press.
- Harrison, R.G., 2014: *Meteorological Measurements and Instrumentation*. John Wiley & Sons.
- Ingleby, B., D. Moore, C. Sloan and R. Dunn, 2013: Evolution and accuracy of surface humidity reports. *Journal of Atmospheric Oceanic Technology*, 30(9):2025–2043.
- Institute of Measurement and Control and National Physical Laboratory, 1996: *A Guide to the Measurement of Humidity*. London, Institute of Measurement and Control.
- Joint Committee for Guides in Metrology, 2012: *International Vocabulary of Metrology – Basic and General Concepts and Associated Terms (VIM)*. Third edition. JCGM 200:2012.
- Sonntag, D., 1990: Important new values of the physical constants of 1986, vapour pressure formulations based on the ITS-90 and psychrometer formulae. *Zeitschrift für Meteorologie*, 40(5):340–344.
- , 1994: Advancements in the field of hygrometry. *Meteorologische Zeitschrift*, 3(2):51–66.
- Wexler, A. (ed.), 1965: *Humidity and Moisture*. Volumes 1–3. New York, Reinhold.
- World Meteorological Organization, 1989a: *WMO Assmann Aspiration Psychrometer Intercomparison* (D. Sonntag) (WMO/TD-No. 289). Instruments and Observing Methods Report No. 34. Geneva.
- , 1989b: *WMO International Hygrometer Intercomparison* (J. Skaar, K. Hegg, T. Moe and K. Smedstud) (WMO/TD-No. 316). Instruments and Observing Methods Report No. 38. Geneva.
- , 1992: *Measurement of Temperature and Humidity: Specification, Construction, Properties and Use of the WMO Reference Psychrometer* (R.G. Wylie and T. Lalas) (WMO-No. 759). Technical Note No. 194. Geneva.
- , 2011a: *WMO Field Intercomparison of Thermometer Screens/Shields and Humidity Measuring Instruments: Ghardaia, Algeria, November 2008–October 2009* (M. Lacombe, D. Bousri, M. Leroy and M. Mezred) (WMO/TD-No. 1579). WMO Instruments and Observing Methods Report No. 106. Geneva.
-