

СОДЕРЖАНИЕ

	Стр.
ГЛАВА 4. ИЗМЕРЕНИЕ ВЛАЖНОСТИ	141
4.1 Общие сведения	141
4.1.1 Определения	141
4.1.2 Единицы измерения	141
4.1.3 Метеорологические потребности	142
4.1.4 Методы измерения	142
4.1.4.1 Гигрометры	142
4.1.4.2 Размещение приборов: общие требования	142
4.1.4.3 Источники погрешностей: общие замечания	143
4.1.4.4 Гравиметрическая гигрометрия	143
4.1.4.5 Методы конденсации	144
4.1.4.6 Психрометрический метод	144
4.1.4.7 Адсорбционные (абсорбционные) методы	145
4.1.4.8 Поглощение электромагнитного излучения водяным паром (гигрометры, основанные на поглощении ультрафиолетового и инфракрасного излучения)	146
4.1.4.9 Постоянные времени датчиков влажности	146
4.1.4.10 Уход за приборами: общие положения	146
4.1.4.11 Защитные фильтры	148
4.2 Психрометр	148
4.2.1 Общие сведения	148
4.2.1.1 Психрометрические формулы и таблицы	148
4.2.1.2 Спецификация психрометра	149
4.2.1.3 Обвязка из ткани для смоченного термометра	150
4.2.1.4 Работа со смоченным термометром при температуре ниже точки инея	150
4.2.1.5 Общая процедура проведения наблюдений	152
4.2.1.6 Использование электрических термометров сопротивления	152
4.2.1.7 Источники погрешностей в психрометрии	152
4.2.2 Аспирационный психрометр Асмана	154
4.2.2.1 Описание	154
4.2.2.2 Процедура наблюдения	154
4.2.2.3 Размещение и установка прибора	155
4.2.2.4 Калибровка	155
4.2.2.5 Уход за прибором	155
4.2.3 Психрометр в жалюзийном метеорологическом экране (будке)	156
4.2.3.1 Описание	156
4.2.3.2 Процедуры специальных наблюдений	156
4.2.3.3 Размещение и установка прибора	157
4.2.4 Пращевые психрометры	157
4.2.4.1 Описание	157
4.2.4.2 Процедура наблюдений	157
4.2.5 Психрометр с предварительным подогревом воздуха	157
4.2.5.1 Описание	158
4.2.5.2 Процедура наблюдений	158
4.2.5.3 Размещение и установка прибора	158
4.2.6 Эталонный психрометр ВМО	158
4.3 Волосной гигрометр	159
4.3.1 Общие сведения	159
4.3.2 Описание	160
4.3.3 Процедура наблюдений	160
4.3.4 Размещение и установка прибора	161
4.3.5 Источники погрешностей	161
4.3.5.1 Смещение нуля	161
4.3.5.2 Погрешности, обусловленные загрязнением волоса	161
4.3.5.3 Гистерезис	161
4.3.6 Калибровка и сравнения	162
4.3.7 Уход за прибором	162

4.4	Гигрометр точки росы с охлаждаемым зеркалом	163
4.4.1	Общие сведения	163
4.4.1.1	Теория	163
4.4.1.2	Принципы	163
4.4.2	Описание	164
4.4.2.1	Устройство датчика	164
4.4.2.2	Устройство оптического обнаружения	164
4.4.2.3	Устройство регулирования температуры	164
4.4.2.4	Система визуального отображения температуры	165
4.4.2.5	Вспомогательные системы	165
4.4.3	Процедура наблюдения	166
4.4.4	Размещение и установка прибора	166
4.4.5	Калибровка	167
4.5	Конденсационный гигрометр с подогреваемым раствором хлорида лития (подогреваемый гигрометр точки росы)	167
4.5.1	Общие сведения	167
4.5.1.1	Принципы	167
4.5.1.2	Описание	168
4.5.1.3	Датчики с прямым нагревом	168
4.5.1.4	Датчики с косвенным нагревом	169
4.5.2	Эксплуатация прибора	170
4.5.3	Размещение и установка прибора	170
4.5.4	Источники ошибок	170
4.5.5	Поверка и калибровка в полевых условиях	171
4.5.6	Уход за прибором	171
4.6	Электрические гигрометры сопротивления и емкости	171
4.6.1	Общие сведения	171
4.6.2	Электрическое сопротивление	171
4.6.3	Электрическая емкость	172
4.6.4	Процедура наблюдения	172
4.6.5	Размещение и установка прибора	172
4.6.6	Поверка и калибровка в полевых условиях	172
4.6.7	Уход за прибором	172
4.7	Гигрометры, основанные на поглощении электромагнитного излучения	173
4.8	Техника безопасности	173
4.9	Эталонные приборы и калибровка	174
4.9.1	Принципы калибровки гигрометров	174
4.9.2	Интервалы и методы калибровки	175
4.9.3	Лабораторная калибровка	175
4.9.4	Первичные эталоны	177
4.9.4.1	Гравиметрическая гигрометрия	177
4.9.4.2	Динамический эталонный генератор влажности с использованием двух давлений	177
4.9.4.3	Динамический эталонный генератор влажности с использованием двух температур	178
4.9.5	Вторичные эталоны	178
4.9.6	Рабочие эталоны (и образцовые приборы для полевых условий)	178
4.9.7	Эталонный психрометр ВМО	178
4.9.8	Растворы солей	179
	ПРИЛОЖЕНИЕ 4.А. ВОДЯНОЙ ПАР В АТМОСФЕРЕ — ТЕРМИНЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ	181
	ПРИЛОЖЕНИЕ 4.В. ФОРМУЛЫ ДЛЯ РАСЧЕТА ХАРАКТЕРИСТИК ВЛАЖНОСТИ	185
	СПРАВОЧНАЯ И ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА	187

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. Старый, но все еще полезный общий обзор используемых методов приведен в работе Wexler (1965).

4.1.1 Определения

Определения терминов, используемых в настоящей главе, соответствуют определениям, приведенным в *Техническом регламенте ВМО* (ВМО, 2011а, приложение В), полный текст которого воспроизведен в приложении 4.А.

Ниже приведены определения характеристик, наиболее часто используемых при измерении влажности воздуха:

Отношение смеси r : отношение массы водяного пара к массе сухого воздуха;

Удельная влажность q : отношение массы водяного пара к массе влажного воздуха;

Точка росы T_d : температура, при которой отношение смеси влажного воздуха, насыщенного относительно воды при заданном давлении, равно заданному отношению смеси;

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;

Давление насыщенного водяного пара e'_w and 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 (WMO, 1989а).

С более точными и подробными формулировками этих и других характеристик влажности воздуха можно ознакомиться в работе Sonntag (1990; 1994). Другие подробные формулировки² представлены в публикациях ВМО (WMO, 1966, введения к таблицам 4.8–10) и ВМО (2011а, приложение А).

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:

- а) отношение смеси r и удельная влажность q ($\text{кг} \cdot \text{кг}^{-1}$);

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

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

- b) давление водяного пара в воздухе e' , e'_w , e'_i и атмосферное давление p (гПа);
- c) температура воздуха T , температура смоченного термометра T_w , температура точки росы T_d и температура точки инея T_f (К);
- d) температура воздуха t , температура смоченного термометра t_w , температура точки росы t_d и температура точки инея t_f (°C);
- e) относительная влажность воздуха U (%).

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 части I, глава 1, приложение 1.E. Перечисленные в этой таблице достижимые точности относятся к приборам высокого класса, которые надлежащим образом обслуживаются и эксплуатируются. На практике таких результатов достичь нелегко. В частности, очень низкая точность получается при измерении влажности воздуха с помощью психрометра, размещаемого в метеорологической будке без принудительной вентиляции.

При измерениях влажности для большинства целей приемлемы постоянные времени порядка одной минуты. Время ответных реакций, возникающих в рабочих приборах, обсуждается в разделе 4.1.4.9.

4.1.4 Методы измерения

Общий обзор состояния в области гигрометрии приводится в работе Sonntag (1994).

4.1.4.1 Гигрометры

Прибор для измерения влажности воздуха называется гигрометром. Физические принципы, наиболее широко используемые в гигрометрии, описаны ниже в разделах 4.1.4.4–4.1.4.8. С более подробной информацией о различных методах можно ознакомиться в работе Wexler (1965). Отчет по международным сравнениям различных гигрометров под эгидой ВМО приведен в публикации WMO (1989b).

4.1.4.2 Размещение приборов: общие требования

Общие требования к размещению приборов и датчиков 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 датчика 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 разделах 4.2–4.7.

В классификации размещения площадок для станций наземных наблюдений на суше (см. часть I, глава 1, приложение 1.В настоящего Руководства) 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 следующими причинами:

- a) изменение состояния пробы воздуха, например, под воздействием тепла либо источника или поглотителя водяного пара;
- b) загрязнение датчика, например, грязью, брызгами морской воды;
- c) ошибка калибровки, включая корректировку влияния давления, температурный коэффициент датчика и электрического устройства сопряжения;
- d) неправильное определение фазы вода/лед;
- e) плохая конструкция прибора, например, препятствия для поступления тепла к смоченному термометру или передача тепла от столбика жидкости термометра к резервуару смоченного термометра;
- f) неправильная эксплуатация, например, пренебрежение необходимостью достижения устойчивого равновесия;
- g) неправильный отбор проб и/или выбор интервалов усреднения.

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

Различные виды датчиков влажности обладают разной степенью обладания каждым из вышеуказанных факторов, и соответственно их значимость для приборов различна, что обсуждается далее в настоящей главе.

4.1.4.4 **Гравиметрическая гигрометрия**

Гравиметрический метод основан на использовании абсорбции водяного пара из известного объема воздуха каким-либо влагопоглотителем (гравиметрический гигрометр, используется только для первичных эталонов). Некоторые подробности приведены в разделе 4.9.

Гравиметрический метод позволяет воспроизвести абсолютную меру содержания водяного пара в пробе воздуха в виде отношения смеси влажного воздуха. Результат получают, прежде всего, извлечением водяного пара из пробы. Масса водяного пара определяется путем взвешивания осушающего агента до и после абсорбции пара. Масса сухой пробы определяется путем либо взвешивания, либо измерения ее объема.

Применение этого метода ограничено использованием в качестве абсолютного эталона сравнения для калибровки. Такой прибор можно найти, главным образом, в национальных лабораториях эталонов для калибровки.

4.1.4.5 **Методы конденсации**

4.1.4.5.1 **Метод с использованием охлаждаемого зеркала (гигрометр точки росы или точки инея)**

Когда влажный воздух при температуре T , давлении p и отношении смеси r_w (или r_p) охлаждается, он в конечном итоге достигает насыщения относительно воды (или относительно льда при более низких температурах), и на твердой негигроскопичной поверхности можно обнаружить росу (или иней). Температура, при которой достигается состояние насыщения является точкой росы T_d (или точкой инея T_f).

Гигрометр с охлаждаемым зеркалом используется для измерения T_d или T_f . В наиболее часто применяемых системах применяется небольшая отражающая поверхность из отполированного металла, которая охлаждается с использованием устройства, основанного на термоэлектрическом эффекте Пельтье, а продукт конденсации распознается при помощи оптического детектора.

Приборы, основанные на методе конденсации, применяются в практике наблюдения, и могут также использоваться в качестве рабочих эталонов и/или сравнительных эталонов (см. раздел 4.4).

4.1.4.5.2 **Метод с использованием нагретого солевого раствора (гигрометр равновесного давления пара, известный как конденсационный гигрометр)**

Равновесное давление пара над поверхностью насыщенного солевого раствора меньше, чем над аналогичной поверхностью чистой воды при том же значении температуры. Это явление характерно для всех солевых растворов, однако особенно ярко оно проявляется над поверхностью раствора хлорида лития, для которого характерно весьма низкое равновесное давление пара.

Водный солевой раствор (равновесное давление насыщенного водяного пара над которым ниже давления пара в окружающем воздухе) может быть нагрет до такой температуры, при которой равновесное давление насыщенного водяного пара над ним несколько превысит парциальное давление водяного пара в окружающем воздухе. В этот момент баланс перемещается от конденсации к испарению, и в конечном итоге наступает фаза перехода жидкого раствора в твердую гидратную (кристаллогидратную) форму. Момент этого перехода можно определить благодаря характерному уменьшению электрической проводимости раствора по мере того, как он кристаллизуется. Температура раствора, при которой достигается равенство давления насыщенного водяного пара над поверхностью кристаллогидрата соли парциальному давлению водяного пара в окружающем воздухе, является мерой для определения этого давления. Для этой цели термометр размещают таким образом, чтобы он имел хороший термический контакт с раствором. Точка росы окружающего воздуха (относительно плоской поверхности химически чистой воды) может быть определена на основе эмпирических данных, отражающих связь давления насыщенного водяного пара с температурой для чистой воды и для соляных растворов. Наиболее часто для данного вида датчика используется раствор хлорида лития.

Описанный метод используется в практике наблюдений, особенно на автоматических метеорологических станциях (см. раздел 4.5).

4.1.4.6 **Психрометрический метод**

Психрометр состоит из двух размещенных рядом друг с другом термометров. Поверхность чувствительного элемента одного из них покрыта тонкой пленкой воды или льда, и он называется смоченным термометром или покрытым льдом термометром, соответственно. Чувствительный элемент второго термометра просто находится на воздухе, и этот термометр называется сухим термометром. Этот метод по-прежнему используется наиболее широко, он подробно описывается в разделе 4.2.

Вследствие испарения воды с поверхности смоченного термометра, температура, измеряемая смоченным термометром, как правило, ниже, чем температура, измеряемая сухим термометром. Разность этих температур является мерой влажности воздуха: чем ниже влажность окружающего воздуха, тем больше скорость испарения и соответственно больше разность между температурой смоченного термометра и температурой сухого термометра. Соотношение между этой разностью температур и влажностью окружающей среды описывается психрометрической формулой.

Данный метод широко используется в практике метеорологических наблюдений. Приборы, основанные на психрометрическом методе, также часто используются в качестве рабочих эталонов.

4.1.4.7 **Адсорбционные (абсорбционные) методы**

У некоторых материалов при взаимодействии с водяным паром изменяется какое-либо химическое или физическое свойство, которое в достаточной степени обратимо, чтобы быть использованным в качестве показателя влажности окружающей среды. Водяной пар может адсорбироваться или абсорбироваться материалом; при этом под адсорбцией подразумевается поглощение одного вещества поверхностным слоем другого вещества, а под абсорбцией — проникновение какого-либо вещества вовнутрь массы другого вещества. Гигроскопичным называют вещество, характерным свойством которого является абсорбирование водяного пара из окружающей атмосферы вследствие того, что давление насыщенного пара в нем ниже, чем давление пара в окружающей атмосфере. Одно из необходимых условий процесса абсорбции заключается в том, что давление водяного пара в окружающей атмосфере должно быть выше, чем давление насыщенного пара в веществе. Для процесса адсорбции (абсорбции) характерны следующие два свойства:

- а) Изменение размеров гигроскопических материалов: размеры некоторых материалов изменяются в зависимости от влажности. Наибольшие пропорциональные изменения размеров характерны для натуральных волокон, и при использовании механической рычажной системы они могут быть встроены в аналоговый измерительный преобразователь линейных перемещений. Преобразователь может быть сконструирован таким образом, чтобы стрелка над шкалой обеспечивала визуальное отображение или чтобы электромеханическое устройство обеспечивало электрические выходные сигналы.

Наиболее часто для такого вида датчиков влажности используется обезжиренный человеческий волос. Вместо человеческого волоса могут использоваться также и синтетические волокна. Однако из-за того, что для синтетических волокон характерен очень длительный период запаздывания, такие датчики не могут использоваться при температуре ниже 10 °С. Волосной гигрометр описывается в разделе 4.3.

Специально обработанная «пленка» (органическая мембрана, получаемая из тканей-биомембран домашних животных) обладает свойствами, аналогичными свойствам человеческого волоса, и также используется для измерения влажности, хотя в основном в устройствах для аэрологических измерений.

- б) Изменение электрических свойств гигроскопичных материалов: электрические свойства некоторых гигроскопичных материалов изменяются в зависимости от относительной влажности окружающей среды при очень слабой зависимости от температуры. Основанные на использовании этих свойств методы, наиболее широко применяемые в настоящее время, описываются в разделе 4.6.

Электрические датчики относительной влажности воздуха используются все чаще в дистанционных приборах, в частности там, где требуется прямое визуальное отображение значений относительной влажности.

Приборы для измерения относительной влажности, основанные на использовании электрических свойств, включают в себя и датчики, изготовленные из химически

обработанных пластиковых материалов с электропроводящим поверхностным слоем (электрическое сопротивление), и датчики, основанные на изменении диэлектрических свойств твердого гигроскопичного материала в зависимости от относительной влажности окружающей среды (электрическая емкость).

4.1.4.8 ***Поглощение электромагнитного излучения водяным паром (гигрометры, основанные на поглощении ультрафиолетового и инфракрасного излучения)***

Молекула воды поглощает электромагнитное излучение (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. Наиболее подходящими для этой цели областями электромагнитного спектра являются ультрафиолетовая и инфракрасная. Лежащий в основе этого метода принцип заключается в определении ослабления потока излучения в диапазонах длин волн, соответствующих полосам поглощения водяным паром, на трассе между источником излучения и принимающим устройством. Существуют два основных метода для определения степени ослабления излучения, а именно:

- а) передача излучения в узком диапазоне с фиксированной интенсивностью к прокалиброванному принимающему устройству;
- б) 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.

Оба типа приборов нуждаются в частой калибровке и лучше всего подходят для измерения изменений концентрации пара, а не ее абсолютных значений. Использование этих приборов ограничивается научно-исследовательской деятельностью; их краткое описание приведено в разделе 4.7.

4.1.4.9 ***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 4.1 приведены значения постоянной времени $1/e$, характерные для различных типов датчиков влажности.

4.1.4.10 ***Уход за приборами: общие положения***

Рассмотрим следующие процедуры по техническому обслуживанию приборов:

- а) поддержание чистоты: датчики и их защитные оболочки должны содержаться в чистоте. Некоторые датчики, например, датчики волосных 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

Таблица 4.1. Постоянные времени датчиков влажности

При 85 % относительной влажности	Постоянная времени (для 1/е), с		
Тип сенсора или гигрометра	20 °С	0 °С	–20 °С
Обычный человеческий волос	32	75	440
Прокатанный волос	10	10	12
Золотобитная пленка	10	16	140
Емкостный	1–10	1–10	1–10
Резистивный	1–10	—	—
Психрометр Асмана	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.

с полимерной основой ни в коем случае нельзя очищать подобным образом. В связи с этим чрезвычайно важно наличие инструкций по очистке приборов для наблюдателей и обслуживающего персонала;

- б) поверка и калибровка полевых приборов: все датчики влажности, эксплуатируемые в полевых условиях, нуждаются в регулярной калибровке. Калибровка психрометров и гигрометров «точки росы», в которых используется температурный детектор, может проводиться в ходе каждого регулярного профилактического обслуживания. По меньшей мере, один раз в месяц необходимо проводить также сравнение с рабочим эталонным гигрометром, таким как психрометр Асмана.

В приборах с насыщенными растворами солей используются датчики, для которых необходима лишь небольшая по объему проба воздуха. При этом требуется очень стабильная температура окружающей среды, поэтому нет полной уверенности в надежности таких приборов при их использовании в полевых условиях.

Преимущество использования аспирационного психрометра стандартного вида, такого как психрометр Асмана, в качестве полевого эталона заключается в том, что его собственная эксплуатационная пригодность может быть проверена путем сравнения сухого и смоченного термометров и что при наличии хорошо работающего вентилятора можно ожидать надлежащей аспирации. 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.

4.1.4.11 **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 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 должны, как правило, защищаться 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.

4.2 **ПСИХРОМЕТР**

4.2.1 **Общие сведения**

4.2.1.1 **Психрометрические формулы и таблицы**

Ниже представлена в общем виде существующая практика построения психрометрических таблиц.

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.)

Температура смоченного термометра T_w для большинства приборов не идентична 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 (в этой связи см. раздел 4.2.6).

В целом коэффициент A зависит от конструкции психрометра (в частности, системы смоченного термометра), 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 хорошо вентилируемых психрометров. Значение A слабо зависит от температуры и влажности воздуха, и его зависимость от этих переменных считается, как правило, незначительной. В случае, когда смоченный термометр покрыт льдом, коэффициент A меньше, чем когда он покрыт водой.

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

4.2.1.2 Спецификация психрометра

Оборудование, используемое для психрометрических наблюдений, должно, насколько это практически возможно, соответствовать следующим рекомендациям (см. разделы 4.2.3 и 4.2.6):

- а) на уровне моря и тогда, когда используются термометры тех типов, которые обычно применяются на метеорологических станциях, скорость вентиляции термометров должна быть в пределах $2,2\text{--}10 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$. 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 Асмана, 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;

- c) 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;
- d) необходимо очень тщательно следить за тем, чтобы не происходило передачи значительного количества тепла от мотора вентилятора к термометрам;
- e) 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.

4.2.1.3 **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.

Ткань, которая покрывает смоченный термометр, должна быть тонкой, но плотной. 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 может быть использован раствор чистого детергента в воде. В случае, когда используется фитиль, его следует обрабатывать аналогичным образом.

Любое видимое загрязнение фитиля или обвязки из ткани для смоченного термометра следует рассматривать как абсолютное свидетельство необходимости их замены. При работе с фитилем и обвязкой из ткани следует проявлять большую осторожность, чтобы предотвратить их загрязнение от рук. Для смоченного термометра следует использовать дистиллированную воду.

Очень важен надлежащий уход за смоченным термометром. Наблюдателям следует регулярно заменять обвязку из ткани и фитиль для смоченного термометра. Такая замена должна проводиться во всех используемых на постоянной основе психрометрах, по меньшей мере, один раз в неделю. В местах, расположенных недалеко от моря, в запыленных или 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.

4.2.1.4 **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 температуре смоченного термометра ниже 0 °C использование фитиля 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.

По мере возможности следует обеспечивать также, чтобы температура воды была близка к точке замерзания. Если на нижней части резервуара термометра образуется наrost 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. Термометр в аспирационных и прачевых психрометрах должен смачиваться непосредственно перед измерением.

Испарение слоя льда можно предотвратить или замедлить, помещая смоченный термометр в небольшую стеклянную трубку или закрывая вентиляционное отверстие смоченного термометра между наблюдениями. (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 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 или другим предметом сразу же после завершения наблюдения. 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 таблиц, подходящих для случаев, когда резервуар смоченного термометра покрыт льдом, иницируя замерзание переохлажденной воды способом, указанным в пункте (a). В целях экономии времени и обеспечения покрытия смоченного термометра льдом наблюдателю следует иницировать 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. Рекомендуются, однако, иницировать 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.

4.2.1.5 **Общая процедура проведения наблюдений**

Для измерения температуры необходимо следовать процедурам, описанным в части I, 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 десятой доли градуса;
- c) при проведении наблюдения необходимо считывать показания с двух термометров, по мере возможности одновременно, и следить, чтобы к смоченному термометру поступало достаточное количество воды.

4.2.1.6 **Использование электрических термометров сопротивления**

Вместо стеклянных ртутных 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 выбранные сопрягающие электрические цепи удовлетворяли требованиям, предъявляемым к рабочим характеристикам. Эти требования подробно изложены в части I, глава 2. Особое внимание следует всегда уделять самонагреву, возникающему в электрических термометрах.

Психрометрические формулы в приложении 4.B, используемые для аспирационных психрометров Асмана, действительны также, когда вместо стеклянных ртутных приборов используются платиновые термометры сопротивления 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.

4.2.1.7 **Источники погрешностей в психрометрии**

Следует рассмотреть следующие основные источники погрешностей:

- a) инструментальные 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 таблиц влажности (психрометрических таблиц).

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

Таблица 4.2 иллюстрирует погрешности расчета относительной влажности воздуха ε (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 $U = 50$ % и диапазона действительных значений температуры воздуха (при этом подразумевается, что показания сухого термометра соответствуют действительному значению температуры воздуха).

- b) коэффициенты инерции термометров. Для получения наивысшей точности при работе с психрометром желательно обеспечить такое положение, при котором как

Таблица 4.2. Значения погрешности расчета относительной влажности воздуха за счет неучета инструментальных ошибок смоченного и покрытого льдом термометров $\varepsilon(t_x)$ при $U = 50\%$

Температура воздуха, °C	Значения погрешности расчета относительной влажности $\varepsilon(U)$ в % за счет неучета инструментальных погрешностей смоченного и покрытого льдом термометров	
	$\varepsilon(t_x) = 0,5\text{ K}$	$\varepsilon(t_x) = 0,1\text{ K}$
-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

смоченный, так и сухой термометры имели бы примерно одинаковый коэффициент инерции; в случае, когда термометры имеют резервуары одинакового размера, инерция смоченного термометра значительно меньше, чем сухого.

- c) погрешности, связанные с вентиляцией. Погрешности, связанные с недостаточной вентиляцией, приобретают гораздо более серьезное значение при использовании неадекватных таблиц влажности (см. разделы, посвященные отдельным видам психрометров).
- d) погрешности, обусловленные чрезмерным слоем льда на резервуаре смоченного термометра. Поскольку толстый слой льда на резервуаре увеличивает инерцию термометра, следует немедленно удалять такой лед, погружая резервуар в дистиллированную воду.
- e) 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.
- f) 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 избежать, если тканью обертывать резервуар термометра таким образом, чтобы верхний конец ткани был бы, по крайней мере, на 2 см выше резервуара смоченного термометра.

4.2.2 Аспирационный психрометр Асмана

4.2.2.1 Описание

Аспирационный психрометр Асмана представляет собой систему из двух стеклянных ртутных термометров, помещенных вертикально друг рядом с другом в отполированных металлических оправках с хромовым или никелевым покрытием и соединенных каналами с вентилятором. Вентилятор может приводиться в действие либо пружинным, либо электрическим двигателем. Резервуар одного из термометров обвязан плотно прилегающим к его поверхности одним слоем тонкой ткани, который перед измерениями смачивается дистиллированной водой. 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 Асмана 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 $2,2 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$. Не все из имеющихся на рынке приборов полностью удовлетворяют этим требованиям. Подробно данный вопрос рассматривается в публикации ВМО (WMO, 1989a). При работе с психрометрами Асмана в полевых условиях можно достичь такой же точности, как указано в части I, глава 1, приложение 1.E настоящего Руководства, а при более тщательных измерениях точность можно значительно повысить.

В приложении 4.B приведены стандартные формулы для расчета значений величин, характеризующих влажность, на основе данных измерений, проведенных при помощи психрометра Асмана³ и некоторых других психрометров с принудительной вентиляцией, при отсутствии других хорошо обоснованных формул.

4.2.2.2 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.

Ртутные столбики термометров следует проверять на наличие в них разрывов ртути, которые следует устранять; при необходимости следует заменить термометр.

При эксплуатации термометры должны, как правило, находиться в вертикальном положении. Термометры должны быть защищены от солнечного излучения. Для этого прибор ориентируется так, чтобы боковые щитки находились на одной линии с солнцем. Прибор 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°C , следует выполнить после начала вентиляции не менее трех измерений с интервалом 1 минута. При температуре ниже 0°C 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

³ Рекомендовано Комиссией по приборам и методам наблюдений на ее десятой сессии (1989 г.).

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 Асмана 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.

4.2.2.3 ***Размещение и установка прибора***

При наблюдениях 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.

4.2.2.4 ***Калибровка***

Система вентиляции должна проверяться регулярно, по меньшей мере, один раз в месяц.

Регулярно должна проводиться также калибровка термометров. Два термометра могут сравниваться друг с другом, когда они оба измеряют температуру сухого термометра. По меньшей мере, один раз в год должно проводиться сравнение термометров с зарегистрированным эталонным термометром.

4.2.2.5 ***Уход за прибором***

В периоды между снятием показаний 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.

4.2.3 Психрометр в жалюзийном метеорологическом экране (будке)

4.2.3.1 Описание

Два стеклянных ртутных термометра с резервуарами в форме шариков монтируются вертикально в психрометрической будке. Диаметр шариков должен составлять примерно 10 мм. Шарик одного из термометров обвязан хлопчатобумажной тканью, которая должна плотно прилегать к шарiku и быть выше резервуара термометра, по меньшей мере, на 20 мм. 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 верхней частью шарика 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 шарик термометра. Если фитиль не используется, смоченный термометр должен быть защищен от загрязнения путем помещения шарика в небольшую стеклянную трубку в периоды между снятием показаний.

Рекомендуется обеспечивать для психрометров в будке принудительную вентиляцию, скорость которой для обоих термометров должна составлять примерно $3 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$. На практике используются как пружинные, так и электрические вентиляторы. Поток воздуха следует направлять поперек шариков термометров в горизонтальном направлении, а не вертикально, и он должен ослабевать таким образом, чтобы не возникало рециркуляции.

Погрешности измерений по психрометру в будке могут быть значительно больше, чем приведенные в части I, глава 1, приложение 1.Е настоящего Руководства, особенно при слабом ветре, если в будке нет принудительной вентиляции.

Психрометрические формулы, приведенные в разделе 4.2.1.1, применимы к психрометрам в будке, однако значения психрометрических коэффициентов носят довольно неопределенный характер. Общие сведения о некоторых используемых формулах приведены в работе Bindon (1965). Если принудительная вентиляция осуществляется со скоростью $3 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$ или больше поперек шарика смоченного термометра, можно применять формулы, представленные в приложении 4.В с психрометрическим коэффициентом, равным $6,53 \cdot 10^{-4} \text{ К}^{-1}$ для воды. При этом для смоченного термометра при температуре выше 0°C используются значения $6,50\text{--}6,78 \cdot 10^{-4}$, а при температуре ниже 0°C $5,70\text{--}6,53 \cdot 10^{-4}$. Для психрометра в будке с естественной вентиляцией используемые коэффициенты варьируют в пределах $7,7\text{--}8,0 \cdot 10^{-4}$ при температуре выше точки замерзания и в пределах $6,8\text{--}7,2 \cdot 10^{-4}$ 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 $12 \cdot 10^{-4}$ для воды и $10,6 \cdot 10^{-4}$ для льда.

Психрометрический коэффициент, соответствующий конкретной конфигурации будки, форме резервуара смоченного термометра и условиям вентиляции, может быть определен путем сравнения с подходящим рабочим или сравнительным эталоном, однако при этом может наблюдаться большой разброс в данных и, следовательно, понадобится проведение масштабного эксперимента для получения стабильного результата. Даже если в ходе такого эксперимента удастся определить стабильное значение коэффициента, доверительный интервал для любого разового наблюдения будет широким, и поэтому будет мало оснований для отступления от использования значений, установленных национальными центрами.

4.2.3.2 Процедуры специальных наблюдений

Процедуры, описанные в разделе 4.2.1.5, 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, правильное 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.

4.2.3.3 **Размещение и установка прибора**

Требования к размещению и установке психрометрической будки описаны в части I, глава 2.

4.2.4 **Пращевые психрометры**

4.2.4.1 **Описание**

Небольшие пращевые психрометры переносного типа состоят из двух стеклянных ртутных 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.

Психрометрические формулы, приведенные в приложении 4.В, также могут использоваться для получения относительной влажности воздуха по результатам измерений такими психрометрами.

4.2.4.2 **Процедура наблюдений**

При наблюдениях следует руководствоваться следующими основными рекомендациями:

- а) все инструкции по обращению с аспирационными психрометрами Асмана применимы также и к пращевым психрометрам;
- б) пращевые психрометры, не оборудованные специальными щитками для защиты резервуаров термометров от солнечного излучения, должны быть защищены от прямого солнечного излучения каким-либо другим способом;
- в) 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.

4.2.5 **Психрометр с предварительным подогревом воздуха**

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.

4.2.5.1 **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.

4.2.5.2 **Процедура наблюдений**

Нагреваемый психрометр подходит для автоматических метеорологических станций.

4.2.5.3 **Размещение и установка прибора**

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

4.2.6 **Эталонный психрометр ВМО**

Эталонный психрометр и процедуры по его эксплуатации описаны в публикации ВМО (WMO, 1992). Смоченный и сухой термометры заключены в вентилируемое защитное устройство для использования в качестве свободно стоящего прибора. Следует подчеркнуть, что психрометрический коэффициент рассчитывается на основе теории теплообмена на смоченном термометре и отличается от коэффициента для других психрометров; он составляет $6,53 \cdot 10^{-4} \text{ K}^{-1}$ при относительной влажности 50 %, температуре воздуха 20 °С и атмосферном давлении 1 000 гПа. Температура смоченного термометра в этом приборе очень близка к теоретическому значению (см. приложение 4.А, пункты 18 и 19). Это обеспечивается очень эффективным испарением со смоченного термометра и сведением к минимуму постороннего нагревания. Естественный поток воздуха, обдувающий резервуар смоченного термометра, контролируется с помощью тщательного подбора формы подводящего воздух канала и формы резервуара термометра, а также скорости вентиляции. Используется двойное защитное устройство, внешняя поверхность которого характеризуется высокой отражательной способностью, а внутренняя – зачернена. Элементы термометров изолированы и отделены защитным устройством. Защитные устройства и элемент смоченного резервуара (который является и термометром) изготовлены из нержавеющей стали с тем, чтобы свести теплопроводность к минимуму.

Процедуры использования эталонного психрометра обеспечивают полное отсутствие жира на смоченном термометре и даже жира в мономолекулярных слоях, который

обычно появляется от пальцев человека, работающего с теми или иными частями прибора. Возможно, это основная причина того, что психрометрический коэффициент эталонного психрометра ВМО очень близок к теоретическому значению и отличается от психрометрических коэффициентов других психрометров.

Эталонный психрометр позволяет достигать очень высокой точности: погрешность определения относительной влажности составляет 0,38 % при относительной влажности 50 % и температуре воздуха 20 °С. Такой психрометр также был принят в качестве эталонного психрометра ВМО. Он разработан для использования в полевых условиях, однако не пригоден для применения в повседневной практике. С ним следует работать только квалифицированному персоналу, который привык к очень тщательной лабораторной работе. Использование этого прибора в качестве эталонного рассматривается в разделе 4.9.7.

4.3 ВОЛОСНОЙ ГИГРОМЕТР

4.3.1 Общие сведения

Для любого абсорбирующего материала характерна тенденция к установлению равновесия с окружающей его средой, как в отношении температуры, так и в отношении влажности. Давление водяного пара над поверхностью материала определяется температурой и количеством воды, поглощенной этим материалом, и разность между ним и давлением водяного пара в окружающем воздухе будет уравниваться за счет обмена молекулами воды.

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 % до 100 %. 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 или гигрометр считается подходящим 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 гигрометра 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 % до 80 % 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 %. 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).

4.3.2 Описание

Детали механизма волосного гигрометра 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.

Наиболее часто используемым видом прибора с волосным чувствительным элементом является гигрограф. В нем 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 гигрометрах может быть использовано и синтетическое волокно. При использовании человеческого волоса его обычно прежде обрабатывают (см. раздел 4.3.1) 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.

4.3.3 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 гигрометра и гигрографа, как правило, снимаются с округлением до 1 % относительной влажности. Необходимо учитывать тот факт, что волосной гигрометр измеряет относительную влажность по отношению к насыщению над водой в жидком состоянии даже при температуре воздуха ниже 0 °C.

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.

4.3.4 **Размещение и установка прибора**

Гигрограф или гигрометр 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.

При использовании гигрографа в полярных районах его предпочтительно размещать в специальной психрометрической будке, которая обеспечивает для прибора достаточную защиту от атмосферных осадков и метелей. Например, в целях предосторожности покрытие для психрометрической будки может быть выполнено из мелкочаистой сетки (Mullergas), которая препятствует накоплению снежных кристаллов на волосном элементе и на несущих поверхностях механического соединения. Такой способ может использоваться лишь в том случае, если не существует опасности смачивания сетки в результате таяния снежных кристаллов.

4.3.5 **Источники погрешностей**

4.3.5.1 **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.

4.3.5.2 **Погрешности, обусловленные загрязнением волоса**

Загрязнение различными видами пыли в большинстве случаев приводит к возникновению существенных погрешностей в данных наблюдений (иногда до 15 % значений относительной влажности). 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. раздел 4.3.4).

4.3.5.3 **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. раздел 4.3.5.1).

4.3.6 Калибровка и сравнения

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 % влажности (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.

4.3.7 Уход за прибором

Наблюдателям рекомендуется содержать гигрометр 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 линеаризирующего механизма приходится значительная часть общего трения в соединительном устройстве. Трение можно уменьшить, полируя поверхности с помощью графита. Такую операцию можно проводить, используя кусок промокательной 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.

4.4 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 разделе 4.1.4.5, 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.

4.4.1.2 Принципы

В случае, когда влажный воздух при температуре T , давлении p и отношении смеси r_w (или r_f) охлаждается, он в конечном итоге достигает точки насыщения относительно свободной поверхности воды (или относительно свободной поверхности льда при более низких значениях температуры), и на твердой негигроскопичной поверхности можно обнаружить отложение росы (или инея). Температура условий насыщения называется термодинамической точкой росы T_d (или термодинамической точкой инея T_f). Давление насыщенного пара относительно воды e'_w (или льда e'_i) является функцией T_d (или T_f). 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 водяного пара с помощью одного лишь датчика температуры.

Для охлаждения ранее использовалась жидкость с низкой точкой кипения, однако в настоящее время оно производится в основном другими способами за исключением случаев очень низких концентраций водяного пара.

Из вышесказанного следует, что, когда температура поверхности соответствует точке замерзания воды или ниже нее, должна существовать также возможность для определения того, является ли конденсат переохлажденной жидкостью или льдом.

Гигрометр с охлаждаемым зеркалом 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 (2–5 мм), температура которого регулируется с помощью охлаждающего узла (и по возможности нагревателя), и датчика температуры (термопары или платинового термометра сопротивления), 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. Подходящими материалами для зеркала могут быть золото, покрытое родием серебро, хромированная медь и нержавеющая сталь.

Зеркало должно быть оборудовано устройством (предпочтительно автоматическим) для обнаружения загрязняющих веществ, которые могут повысить или понизить видимую точку росы (см. раздел 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, однако в настоящее время чаще используется светоизлучающий диод. 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 прекращать, пока слой осажденной воды еще тонок, а уменьшение отражательной способности составляет от 5 % до 40 %. В более сложных системах используется дополнительный фотодетектор, который 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. Также важной для поддержания стабильного осаждения на зеркале является скорость потока воздуха. Считается, что можно определить температуру, при которой происходит конденсация, с точностью до 0,05 К.

Наблюдение за образованием капель воды с использованием микроскопа и регулирование температуры зеркала ручным способом практически возможны, однако выполнение такой задачи требует много времени и большого профессионального мастерства.

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. При очень низких значениях температуры конденсации может потребоваться многоступенчатое устройство с использованием термоэлектрического эффекта Пельтье.

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 охлаждения может использоваться жидкость с низкой точкой кипения, например жидкий азот, однако такая техника уже почти не используется. Аналогичным образом, для нагревания может применяться проволока с высоким электрическим сопротивлением, однако в настоящее время вместо нее все шире используются небольшие устройства, основанные на термоэлектрическом эффекте Пельтье.

4.4.2.4 ***Система визуального отображения температуры***

Температура зеркала, измеренная электрическим термометром, прикрепленным под нижней поверхностью зеркала, представляется наблюдателю 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. Диаграммный самописец особенно полезен для мониторинга данных от прибора в случае, когда аналоговое выходное устройство обеспечивает постоянную регистрацию сигналов от термометра зеркала, а цифровой дисплей этого не обеспечивает.

4.4.2.5 ***Вспомогательные системы***

Для того чтобы обеспечить возможность визуально различить капли переохлажденной воды и кристаллы льда при температуре зеркала ниже 0 °С, в прибор может быть встроен микроскоп. Некоторые приборы в целях обеспечения автоматической процедуры такого определения снабжены смонтированным на поверхности зеркала детектором (например, емкостным датчиком), 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.

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 устраняются с потоком воздуха. Используются также и системы, предусматривающие автоматическое протирание зеркала.

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. 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

Правильное функционирование гигрометра точки росы зависит от достижения надлежащей объемной скорости потока воздуха, проходящего через измерительную камеру. Установка регулятора для этой цели (как правило, дроссельного устройства), размещаемого по ходу потока за измерительной камерой, по-видимому, будет требовать корректировки с учетом суточных колебаний температуры воздуха. Корректировка потока воздуха будет нарушать работу гигрометра, и даже может быть целесообразно инициировать цикл нагревания. Обе эти меры следует принимать 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 палочкой с ватой на конце для устранения любых растворимых загрязняющих веществ. При этом необходимо проявлять осторожность с тем, чтобы не поцарапать поверхность зеркала, особенно там, где она имеет тонкое покрытие для защиты основы или где смонтирован детектор-идентификатор льда/жидкой воды. 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 $\pm 0,3$ K в широком диапазоне значений точки росы (от -60 °C до 50 °C).

4.4.4 Размещение и установка прибора

Критерии, согласно которым следует устанавливать узел датчика, аналогичны критериям для любого аспирационного гигрометра, хотя они и менее строгие, чем для психрометра или датчика относительной влажности, с учетом того факта, 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.

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. 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.

4.4.5 Калибровка

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 Асмана или другим гигрометром с охлаждаемым зеркалом. 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 полезных методов контроля заключается в сравнении измеренных значений температуры зеркала со значениями температуры воздуха, в то время, когда система терморегулирования гигрометра отключена. Следует обеспечить аспирацию в приборе и при этом измерить температуру воздуха около входного отверстия канала вентиляции гигрометра. Такую 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 этой проверки можно увеличить скорость аспирации.

Независимая калибровка в полевых условиях устройства преобразования сигнала от термометра зеркала может быть проведена при помощи имитации такого сигнала. В случае применения платинового термометра сопротивления 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 КОНДЕНСАЦИОННЫЙ ГИГРОМЕТР С ПОДОГРЕВАЕМЫМ РАСТВОРОМ ХЛОРИДА ЛИТИЯ (ПОДОГРЕВАЕМЫЙ ГИГРОМЕТР ТОЧКИ РОСЫ)

4.5.1 Общие сведения

4.5.1.1 Принципы

Физические принципы, на которых основан метод использования подогретого солевого раствора, рассматриваются в разделе 4.1.4.5.2. 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 °С. При точке росы окружающего воздуха –23 °С, потенциальная разность значений температуры равновесия, в соответствии с которыми происходят превращения одного из двух растворов гидратов, приводит в результате к погрешности в $\pm 3,5$ К в расчетном значении точки росы.

4.5.1.2 **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 °С до 25 °С соответствуют значения температуры на элементе для определения точки росы в пределах от 17 °С до 71 °С.

4.5.1.3 **Датчики с прямым нагревом**

Датчик состоит из трубки или катушки и вмонтированного в нее вдоль оси термометра сопротивления. Внешняя поверхность этой трубки покрыта стекловолоконным 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. При диапазоне температуры раствора, соответствующего температуре точки росы от $-12\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $41\text{ }^{\circ}\text{C}$, как правило, возникает моногидрат, ниже $-12\text{ }^{\circ}\text{C}$ — дигидрат, а 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 $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$.

4.5.1.4 Датчики с косвенным нагревом

Повышение точности результатов по сравнению с точностью, которая может быть получена при использовании устройства, описанного в разделе 4.5.1.2, 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.

4.5.2 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 контрольные 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.

4.5.3 Размещение и установка прибора

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, исходящее от гигрометра, может повлиять на работу других приборов, и это следует принимать во внимание при выборе места для установки прибора.

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

4.5.4 Источники ошибок

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.

4.5.5 Поверка и калибровка 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.

4.5.6 Уход за прибором

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.

4.6 ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ГИГРОМЕТРЫ СОПРОТИВЛЕНИЯ И ЕМКОСТИ

4.6.1 Общие сведения

Электрические свойства некоторых гигроскопичных материалов изменяются в зависимости от относительной влажности окружающего воздуха и при этом очень слабо зависят от температуры.

Электрические датчики относительной влажности все шире используются для дистанционных измерений, особенно там, где необходимо визуальное отображение значений относительной влажности. В связи с тем, что для многих из них характерны весьма нелинейные ответные реакции на изменения влажности, производители часто поставляют их вместе со специальными системами обработки и визуального отображения данных.

4.6.2 Электрическое сопротивление

Для метеорологических измерений могут использоваться датчики, изготовленные из химически обработанного материала, имеющего электропроводный поверхностный слой, составляющий одно целое с основой из непроводящего материала. Удельное сопротивление поверхности изменяется в зависимости 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.

4.6.3 Электрическая емкость

Данный метод основан на явлении изменения диэлектрических свойств твердого гигроскопичного материала в зависимости от относительной влажности окружающего воздуха. Наиболее часто используются полимерные материалы. Вода, находящаяся в связанном состоянии в полимере, изменяет его диэлектрические свойства вследствие большого дипольного момента молекулы воды.

Активная часть датчика влажности состоит из полимерной пленки и двух электродов, между которыми эту пленку помещают с целью образования конденсатора. Полное сопротивление этого конденсатора служит основой для измерения относительной влажности. Номинальное значение емкости может составлять лишь несколько сот пикофарад 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 кГц; соответственно требуется, чтобы между датчиком и электрическим интерфейсом соединения были короткими для сведения к минимуму паразитной емкости. Таким образом, устройство электрического сопряжения датчиков емкости встроено, как правило, в элемент связи, и необходимо учитывать влияние температуры окружающей среды на функционирование компонентов данной цепи.

4.6.4 Процедура наблюдения

Датчики, работа которых основана на изменениях электрических свойств гигроскопичных материалов, часто используются для дистанционного измерения относительной влажности, а также в автоматических метеорологических станциях.

4.6.5 Размещение и установка прибора

Датчики следует монтировать внутри психрометрической будки, руководствуясь инструкциями производителей относительно установки каждого конкретного датчика. Использование защитных фильтров является обязательным. Прямой контакт с водой в жидком состоянии может серьезно повредить датчики, в которых в качестве чувствительного элемента используется гигроскопичный электролит. Соответственно следует очень внимательно следить за тем, чтобы вода в жидком состоянии не попала на чувствительный элемент таких датчиков.

4.6.6 Поверка и калибровка в полевых условиях

Поверка в полевых условиях и калибровка в лабораторных условиях должны проводиться так же, как и для волосных гигрометров. Для большинства датчиков данного типа имеется подходящее вспомогательное оборудование, позволяющее проводить проверки с использованием соляных растворов.

4.6.7 Уход за прибором

Наблюдателям следует содержать гигрометр в чистоте (см. раздел 4.1.4.10).

4.7 ГИГРОМЕТРЫ, ОСНОВАННЫЕ НА ПОГЛОЩЕНИИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Молекула воды поглощает электромагнитное излучение (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 ультрафиолетовая и инфракрасная области. 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 принимающим устройством. Существуют два основных метода для определения степени ослабления излучения:

- а) 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 ультрафиолетовой области, где наблюдается совсем незначительная абсорбция со стороны других обычных атмосферных газов. Длина измерительной базы составляет, как правило, несколько сантиметров;
- б) 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 инфракрасном диапазоне. Длина измерительной базы составляет в данном случае, как правило, более 1 м.

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.

4.8 ТЕХНИКА БЕЗОПАСНОСТИ

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.

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

- а) 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 смывать большим количеством воды, 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 части I, глава 3, 3.2.7.

4.9 ЭТАЛОННЫЕ ПРИБОРЫ И КАЛИБРОВКА

4.9.1 Принципы калибровки гигрометров

Точность, необходимая при калибровке датчиков 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.

Абсолютный эталон для измерения влажности (а именно, реализация физического определения влагосодержания) может быть реализован на использовании методов и средств гравиметрической гигрометрии. Эталонный психрометр (в рамках его ограниченного диапазона) также является одним из видов первичного эталона, поскольку его рабочие характеристики могут быть рассчитаны. Калибровка вторичных, сравнительных и рабочих эталонов производится в несколько этапов. В таблице 4.3 в компактной форме представлены эталонные средства измерения и воспроизведения значений влажности и их основные характеристики.

На практике поверка в полевых условиях обычно производится при помощи хорошо сконструированных аспирационных психрометров и датчиков 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.

4.9.2 Интервалы и методы калибровки

Все датчики влажности, работающие в полевых условиях, должны регулярно проходить процедуру поверки. 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 Асмана, следует проводить, по меньшей мере, один раз в месяц.

Преимущество использования аспирационного психрометра эталонного типа, такого как психрометр Асмана, 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.

Насыщенные растворы солей применяются при работе с такими датчиками, для которых необходим лишь небольшой объем воздуха. При этом требуется очень стабильная температура окружающего воздуха, и поэтому трудно быть уверенным в надежности результатов их использования 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.

4.9.3 Лабораторная калибровка

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

- a) 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 следует 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 психрометр Асмана или эталонный гигрометр с охлаждаемым зеркалом. В том случае, когда в используемый в полевых условиях прибор встроен детектор льда, следует проверять правильность работы и этой системы.

Таблица 4.3. Эталонные приборы для измерений влажности

Эталонный прибор	Точка росы		Относительная влажность (%)	
	Диапазон (°C)	Неопределенность (K)	Диапазон	Неопределенность
<i>Первичный эталон</i>				
Требование	от –60 до –15	0,3	от 5 до 100	0,2
	от –15 до 40	0,1	от 5 до 100	0,2
Гравиметрический (весовой) гигрометр	от –60 до –35	0,25		
	от –35 до 35	0,03		
	от 35 до 60	0,25		
Эталонный двухтемпературный генератор влажности	от –75 до –15	0,25		
	от –15 до 30	0,1		
	от 30 до 80	0,2		
Эталонный генератор влажности на двух давлениях	от –75 до 30	0,2		
<i>Вторичный эталон</i>				
Требование	от –80 до –15	0,75	от 5 до 100	0,5
	от –15 до 40	0,25		
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	1,0	от 5 до 100	1,5
	от –15 до 40	0,3		
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 Асмана	от –10 до 25		от 40 до 90	1
Гигрометр с охлаждаемым зеркальцем	от –10 до 30	0,5		

- б) 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 соответствующий 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 должна проводиться независимо, по меньшей мере, один раз в 12 месяцев.

4.9.4 Первичные эталоны

4.9.4.1 Гравиметрическая гигрометрия

Гравиметрический метод позволяет получить абсолютную меру содержания водяного пара в пробе воздуха, выраженную в виде его отношения смеси. 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 национальных лабораториях для калибровки эталонов.

4.9.4.2 Динамический эталонный генератор влажности с использованием двух давлений

Данное лабораторное устройство служит в качестве источника влажного газа, относительная влажность которого определяется абсолютным методом. Поток газ-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, т. е. 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 :

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

4.9.4.3 **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.

4.9.5 **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 12 месяцев).

Общие сведения о гигрометре с охлаждаемым зеркалом приведены в разделе 4.4. Этот гигрометр основан на одном из фундаментальных методов определения влажности атмосферы. При условии, что прибор обслуживается и эксплуатируется в полном соответствии с инструкциями производителя, он может обеспечивать первичное измерение точки росы и точки инея в пределах неопределенности, зависящей от соотношения между температурой поверхности зеркала в надлежащей точке цикла конденсации/испарения и температурой, зарегистрированной термометром зеркала во время наблюдения. При использовании этого метода необходимо учитывать эффекты Кельвина и Рауля в отношении температуры конденсации, а при использовании соотношения, приведенного в разделе 4.4.1.2, следует принимать во внимание любые изменения давления воздуха, связанные с техникой отбора проб.

4.9.6 **Рабочие эталоны (и образцовые приборы для полевых условий)**

Гигрометр с охлаждаемым зеркалом или психрометр Асмана 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.

4.9.7 **Эталонный психрометр ВМО**

Психрометр этого типа является по существу первичным эталоном, поскольку эксплуатационные характеристики данного прибора могут быть установлены с помощью расчетов. Однако в основном он используется в качестве высокоточного образцового прибора, и в частности, для типовой поверки других приборных систем в полевых условиях. Он предназначен для использования в качестве автономного прибора, размещаемого рядом с приборами в метеорологической будке или в других полевых

условиях, и это должно быть сделано в полном соответствии с его общей спецификацией. Данный прибор должен эксплуатироваться высококвалифицированным персоналом, имеющим опыт выполнения точных измерений в лабораторных условиях; при этом необходимо уделять надлежащее внимание аспирации и очень тщательно следить за тем, чтобы не происходило загрязнения смоченного термометра от пальцев оператора или от других предметов. Существуют, однако, простые контрольные проверки, при помощи которых можно определить правильность показаний в любой момент времени, и к этим поверкам следует часто прибегать в ходе работы. Описание и инструкции по оперативной эксплуатации психрометра приведены в публикации ВМО (WMO, 1992).

4.9.8 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;
- b) насыщенный солевой раствор обеспечивает стабильную концентрацию относительной влажности, если соль присутствует в обеих фазах: если раствор насыщен солью и некоторое количество соли остается в твердой фазе. В этом случае давление пара зависит только от температуры.

Для калибровки датчиков 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 °C:

Хлорид бария (BaCl_2): 90,3 %
Хлорид натрия (NaCl): 75,3 %
Нитрат магния ($\text{Mg}(\text{NO}_3)_2$): 52,9 %
Хлорид кальция (CaCl_2): 29,0 %
Хлорид лития (LiCl): 11,1 %

Важно, чтобы площадь поверхности раствора была достаточно велика по сравнению с площадью влаговосприимчивого 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.

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 разделе 4.8.

Насыщенные солевые растворы обеспечивают практический метод регулирования гигрометров определённого типа (ёмкостных), однако для целей калибровки следует вместе с этим использовать эталонный прибор.

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

(принятые на основе Технического регламента (ВМО-№ 49), том I, Приложение В)

- 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 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.

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 .

U_w также связано с отношением смеси r следующим образом:

$$U_w = 100 \frac{r}{r_w} \cdot \frac{0,62198 + r_w}{0,62198 + r} \quad (4.A.16)$$

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 °С** должна оцениваться по отношению к воде. Такая процедура имеет следующие преимущества:

- большинство гигрометров определяет относительную влажность по отношению к воде при всех значениях температуры;
- большинство облаков при температуре ниже 0 °С состоят из воды или преимущественно из воды;
- относительная влажность, превышающая 100 %, как правило, не наблюдается; это особенно важно для синоптических сводок погоды, поскольку атмосфера часто перенасыщена по отношению ко льду при значениях температуры ниже 0 °С;
- большая часть существующего массива данных об относительной влажности при значениях температуры ниже 0 °С 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 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:

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

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.

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

(см. также раздел 4.1.2)

Давление насыщенного пара:

$$e_w(t) = 6,112 \exp [17,62 t / (243,12 + t)]$$

Вода (от -45°C до 60°C)
(чистая фаза)

$$e'_w(p, t) = f(p) \cdot e_w(t)$$

Влажный воздух

$$e_i(t) = 6,112 \exp [22,46 t / (272,62 + t)]$$

Лед (от -65°C до 0°C) (чистая фаза)

$$e'_i(p, t) = f(p) \cdot e_i(t)$$

Влажный воздух

$$f(p) = 1,0016 + 3,15 \cdot 10^{-6} p - 0,074 p^{-1}$$

[см. Примечание]

Точка росы и точка инея:

$$t_d = \frac{243,12 \cdot \ln [e' / 6,112 f(p)]}{17,62 - \ln [e' / 6,112 f(p)]}$$

Вода (от -45°C до 60°C)

$$t_f = \frac{272,62 \cdot \ln [e' / 6,112 f(p)]}{22,46 - \ln [e' / 6,112 f(p)]}$$

Лед (от -65°C до 0°C)

Психрометрические формулы для психрометра Асмана:

$$e' = e'_w(p, t_w) - 6,53 \cdot 10^{-4} \cdot (1 + 0,000944 t_w) \cdot p \cdot (t - t_w)$$

Вода

$$e' = e'_i(p, t_i) - 5,75 \cdot 10^{-4} \cdot p \cdot (t - t_i)$$

Лед

Относительная влажность:

$$U = 100 e' / e'_w(p, t) \%$$

$$U = 100 e'_w(p, t_d) / e'_w(p, t) \%$$

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 (WMO, 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 (WMO, 1989a), 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 (WMO, 1966).

СПРАВОЧНАЯ И ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА

- Всемирная метеорологическая организация, 2011a: *Технический регламент* (ВМО-№ 49), том I. Женева.
- Anderson, P.S., 1995: Mechanism for the behavior of hydroactive materials used in humidity sensors. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 12:662–667.
- Bindon, H.H., 1965: A critical review of tables and charts used in psychrometry. In: *Humidity and Moisture* (A. Wexler, ed.), Reinhold, New York, 1:3–15.
- Ingleby, B., D. Moore, C. Sloan and R. Dunn, 2013: Evolution and Accuracy of Surface Humidity Reports. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 30:2025–2043.
- 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. *Zeitschrift für Meteorologie*, 3(2):51–66.
- Wexler, A. (ed.), 1965: *Humidity and Moisture*. Volumes 1 and 3, Reinhold, New York.
- World Meteorological Organization, 1966: *International Meteorological Tables* (S. Letestu, ed.) (1973 amendment). (WMO-No. 188, TP. 94). Geneva.
- , 1989a: *WMO Assmann Aspiration Psychrometer Intercomparison* (D. Sonntag). Instruments and Observing Methods Report No. 34 (WMO/TD-No. 289). Geneva.
- , 1989b: *WMO International Hygrometer Intercomparison* (J. Skaar, K. Hegg, T. Moe and K. Smedstud). Instruments and Observing Methods Report No. 38 (WMO/TD-No. 316). Geneva.
- , 1992: *Measurement of Temperature and Humidity: Specification, Construction, Properties and Use of the WMO Reference Psychrometer* (R.G. Wylie and T. Lalas). Technical Note No. 194 (WMO-No. 759). Geneva.
- , 2011b: *WMO Field Intercomparison of Thermometer Screens/Shields and Humidity Measuring Instruments* (M. Lacombe, D. Bousri, M. Leroy and M. Mezred). Instruments and Observing Methods Report No. 106 (WMO/TD-No. 1579). Geneva.
-