

ГЛАВА 6. ИЗМЕРЕНИЕ КОЛИЧЕСТВА ОСАДКОВ

6.1 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

В настоящей главе описаны хорошо известные методы измерения количества осадков на наземных станциях.

В ней также рассматриваются измерения интенсивности осадков (в частности, величины дождевых осадков или интенсивности дождевых осадков) в связи со всевозрастающей необходимостью таких измерений для интерпретации особенностей дождевых осадков, моделирования и прогнозирования такого явления, как дождевые осадки.

Хотя эта глава включает измерение осадков в виде снега и других твердых продуктов конденсации водяного пара, измерение снега на почве и свежеснегавшего снега подробно обсуждается в томе II, глава 2 настоящего Руководства. В этой главе не рассматриваются измерения, при которых определяются структура и характер осадков, требующие специализированных приборов или не относящиеся к стандартным метеорологическим наблюдениям (например, распределение по размеру капель). Морские и радиолокационные измерения рассматриваются в томе III, главы 4 и 7, настоящего Руководства соответственно, в то время как наблюдения из космоса рассматриваются в томе IV.

Общая проблема репрезентативности особенно остро стоит при измерении количества осадков. На измерения количества осадков существенное влияние оказывают местоположение приборов, ветер и топография, в связи с чем особую важность для потребителей представляют метаданные, описывающие условия, в которых проводятся измерения.

Анализ данных об осадках становится более простым и надежным, если по всей сети используются одинаковые осадкомеры и критерии размещения осадкомерных постов. Это должно быть основным рассматриваемым фактором при проектировании сетей.

6.1.1 Определения

Осадки определяются как жидкие или твердые продукты конденсации водяного пара, выпадающие из облаков, в виде дождя, мороси, снега, снежных зерен, снежных гранул, града и ледяных гранул; или выпадающие из чистого воздуха в виде алмазной пыли. Твердые осадки менее плотные, чем жидкие, и более изменчивы с точки зрения структуры (например, различные формы кристаллов льда или «форм кристаллического строения») и связанной с ними аэродинамики.

Влага также может переноситься на подстилающую поверхность через росу, град, иней или туман, но эти формы осаждающихся из воздуха частиц не включены в определение осадков. Тем не менее, они описаны в 6.6.

Общее количество осадков, которое достигает земной поверхности за какой-то определенный период времени, выражается высотой слоя воды (или водным эквивалентом в случае твердых осадков), который покрыл бы в жидком состоянии горизонтальную проекцию земной поверхности.

Под интенсивностью осадков понимается количество атмосферных осадков, собранных за единицу временного интервала. В соответствии с этим определением данные об интенсивности осадков могут определяться как производная величина от количества измеренных осадков с использованием обычного осадкомера. В этом смысле

интенсивность осадков является вторичным параметром, вычисленным из первичного параметра — количества осадков. Однако интенсивность осадков также может быть измерена напрямую (см. 6.1.4.1).

6.1.2 Единицы измерения

Единица измерений осадков представляет собой линейную высоту, которая обычно для жидких осадков выражается в миллиметрах (объем/площадь) или в $\text{кг} \cdot \text{м}^{-2}$ (масса/площадь). Суточное количество осадков следует определять с точностью до 0,2 мм, а если возможно, то до 0,1 мм. Недельное или месячное количество осадков надо определять с точностью, по меньшей мере, до 1 мм. Суточные измерения осадков следует производить в одно и то же время, общее для всей сети или всех сетей, где производятся измерения. Если количество осадков не превышает 0,1 мм (или 0,2 мм в зависимости от используемого разрешения), то обычно говорят о следах осадков.

Единица измерения интенсивности выражается линейной высотой осадков за один час ($\text{мм} \cdot \text{ч}^{-1}$). Интенсивность дождевых осадков обычно измеряется или определяется как производная величина за временные интервалы, равные одной минуте, в связи с высокой изменчивостью интенсивности от минуты к минуте.

6.1.3 Метеорологические и гидрологические требования

Глава 1, приложение 1.А настоящего тома содержит общее изложение требований к неопределенности, диапазону и разрешению для измерений количества осадков.

Обычно для синоптических, климатологических и гидрологических целей наблюдения производят ежечасно, через 3 часа и ежесуточно. Для некоторых целей, например, для проектирования и управления городскими дренажными системами, прогнозирования и смягчения последствий бурных паводков, принятия мер по обеспечению безопасности транспорта и в целом для большинства применений, когда данные о дождевых осадках получаются в реальном времени, требуется гораздо большее временное разрешение, например, для измерения очень интенсивных осадков за очень короткие периоды (обычно 1 минута для измерения интенсивности дождевых осадков). Некоторые другие прикладные задачи требуют использования суммарных осадкомеров, и интервалы наблюдений составляют недели или месяцы, а в горах и пустынях, даже год.

6.1.4 Методы измерений

6.1.4.1 Приборы

Осадкомеры (или дождемеры, когда можно измерить только жидкие осадки) являются наиболее распространенными для измерения количества осадков приборами. Как правило, используется открытая емкость с вертикальными стенками, имеющая форму правильного цилиндра с воронкой, если основная цель состоит в измерении дождевых осадков. Поскольку размеры и форма приемного отверстия и высота осадкомеров в разных странах различаются, результаты измерений не являются строго сопоставимыми (WMO, 1989a). Измеряется объем или масса осадков, собранных в осадкомере, причем последнее относится, прежде всего, к твердым осадкам. Приемное отверстие осадкомера может располагаться на одной из многих точно заданных высотах над поверхностью земли или на одном уровне с окружающей поверхностью земли. Отверстие должно находиться выше уровня, соответствующего максимальной высоте предполагаемого слоя снежного покрова, и на такой высоте, чтобы исключить попадание брызг с поверхности земли. Более чем в 100 странах чаще всего отверстие осадкомера располагается на высоте от 0,5 до 1,5 м над поверхностью земли (WMO, 1989a).

Измерение осадков существенно зависит от местоположения прибора и особенно от ветра. Для измерения твердых осадков, которые более подвержены воздействию

ветра, чем измерения жидких осадков из-за меньшей плотности гидрометеоров, вокруг отверстия датчика следует установить искусственный экран. Месторасположение прибора обсуждается в разделе 6.2, а в разделе 6.4 довольно подробно описываются ошибки, характерные для измерений, произведенных осадкомерами, и возможные вводимые поправки.

Интенсивность дождевых осадков может быть получена как производная величина от количества осадков, измеренных с использованием плевннграфов (см. 6.5), или измерена напрямую. Последнее может быть сделано, например, используя осадкомер и измеряя поток собранной воды путем измерения прироста количества собранной воды в функции времени, или используя некоторые оптические принципы измерения. Ряд методик по определению количества осадков основывается на этих непосредственных измерениях интенсивности осадков за счет интегрирования измеренной интенсивности за определенный интервал времени.

В этой главе также упоминаются некоторые другие специальные методы измерения твердых осадков и других типов осадков (роса и тому подобное). Некоторые методы и приборы, которые используются в оперативном применении, здесь не рассматриваются; к примеру, одним из таких приборов является оптический осадкомер, в основу которого положен принцип оптического рассеяния. Полезную информацию о новых разрабатываемых методах можно почерпнуть из отчетов регулярно проводимых конференций, таких как Техническая конференция по приборам и методам наблюдений в области метеорологии и окружающей среды (ТЕКО), международные учебно-практические семинары по измерениям количества осадков (Slovak Hydrometeorological Institute and Swiss Federal Institute of Technology, 1993; WMO, 1989b), а также взаимные сравнения приборов, организуемые КПМН (например WMO, 1998).

Измерения осадков в точках служат в качестве основного источника данных для анализа осадков по площади. Однако даже наилучшие измерения осадков в одной точке репрезентативны лишь для ограниченного района, размеры которого представляют собой функцию длительности периода накопления, физико-географической однородности района, местной топографии и осадкообразующего процесса. Радиолокаторы и спутники, используются для определения и количественного выражения пространственного распределения осадков. В принципе можно ожидать, что соответствующая интеграция всех трех источников данных об осадках по площади (автоматические осадкомеры, радиолокаторы и спутники) в национальных осадкомерных сетях обеспечит достаточно точные оценки осадков по площади на оперативной основе для широкого круга потребителей данных об осадках.

Приборы, которые обнаруживают осадки и идентифицируют их тип отдельно от их измерения, могут использоваться в качестве современных датчиков погоды и упоминаются в настоящем томе, глава 14.

6.1.4.2 **Эталонные осадкомеры и взаимные сравнения**

Несколько типов осадкомеров используется в качестве эталонных приборов. Основная особенность их конструкции состоит в том, что уменьшается или регулируется влияние ветра на количество осадков, попавших в прибор. Это влияние является основной причиной различий в показаниях осадкомеров. Эталонные осадкомеры выбираются также для уменьшения других ошибок, описанных в 6.4.

Осадкомеры, установленные на одном уровне с поверхностью земли, используются в качестве эталонных приборов для измерения жидких осадков. Из-за почти полного отсутствия ошибок, обусловленных влиянием ветра, они обычно регистрируют больше осадков, чем любой другой осадкомер, расположенный над поверхностью земли (WMO, 1984, 2009). Осадкомер устанавливается в углублении таким образом, чтобы его приемное отверстие находилось на уровне земли в достаточном отдалении от ближайшего края углубления, чтобы исключить попадание брызг с поверхности земли. Углубление должно закрываться прочной пластиковой или металлической решеткой для защиты от брызг

с отверстием в середине для осадкомера. Необходимо принять меры для осушения углубления. Описание и чертежи стандартного осадкомера приведены в приложении 6.А, и более подробное описание содержится в публикации WMO (2009) и стандарте EN-13798: 2010 (Европейский комитет по стандартизации (CEN), 2010).

Эталонный осадкомер для измерения твердых осадков представляет собой так называемый эталон с двойной заборной защитой, предназначенный для взаимных сравнений (DFIR). Он снабжен восьмиугольной вертикальной двойной заборной защитой; она устанавливается вокруг осадкомера Третьякова, который сам по себе имеет специальную форму ветровой защиты. Чертежи и описание содержатся в публикациях Goodison et al. (1989) и (WMO, 1985, 1998).

Рекомендации по сравнению осадкомеров с эталонными осадкомерами приводятся в приложении 6.В.

6.1.4.3 **Документация**

На результаты измерений количества осадков очень сильно влияет местоположение прибора, поэтому при составлении полного исторического описания станции, используемого при климатологических и других исследованиях и для обеспечения качества данных (ОК), необходимо тщательно зарегистрировать метаданные, т. е. условия измерений.

В разделе 6.2 приводится информация о размещении осадкомерных пунктов, которую необходимо хранить, а именно: подробное описание площадки, включая угловую высоту значительных препятствий вокруг осадкомера, конфигурации осадкомера, высоты расположения приемного отверстия осадкомера над поверхностью земли и высоты над поверхностью земли прибора, измеряющего скорость ветра.

Изменения в методах наблюдения за осадками, главным образом использование другого типа датчика осадков и/или изменение местоположения или конфигурации датчика (например, высота установки, ветрозащитный экран), могут вызвать временные неоднородности во временных рядах осадков (см. Том V, глава 2 настоящего Руководства). Изменения в методах наблюдений за осадками, главным образом, использование различных типов осадкомеров и/или изменение места размещения или конфигурации (например, высота установки приборов, ветрозащитный экран) могут привести к возникновению неоднородностей во временных рядах данных об осадках (см. том V, глава 2 настоящего Руководства). Использование различных типов осадкомеров и различия в их размещении приводят к возникновению пространственных неоднородностей. Это связано с систематическими ошибками в измерении осадков, в основном с ошибками, вызванными влиянием ветра. Статистические методы корректировки позволяют устранить неоднородности в измерениях, произведенных осадкомерами, расположенными по соседству друг с другом, а внесение в результаты измерений поправок на влияние ветра позволяет уменьшить погрешности значений, полученных в результате измерений.

В последующих разделах (особенно в 6.4), посвященных различным типам приборов, описаны поправки, которые могут вводиться в результаты измерений количества осадков. Такие поправки могут также иметь погрешности, поэтому необходимо хранить первоначальные результаты измерений и формулы, по которым поправки рассчитывались.

Следует также документировать любые изменения в методах наблюдений.

6.2 РАЗМЕЩЕНИЕ И УСТАНОВКА

Все методы измерения количества осадков должны быть направлены на получение пробы, репрезентативной по отношению к истинному количеству осадков, выпадающему в исследуемом районе синоптического, мезо- или микромасштаба. Поэтому важен выбор места, а также определение систематической погрешности измерений. Влияние выбора места обсуждается в публикации Sevruck and Zahlavova (1994).

Немаловажным является размещение осадкомерных пунктов в исследуемом районе, так как число этих пунктов и их расположение определяют, насколько репрезентативны произведенные измерения количества осадков для данного района. Более подробная информация о репрезентативности данных о дожде и снеге приведена в публикации WMO (1992a). Введение в литературу, посвященную расчету осадков по площади и поправкам на топографию, содержится в публикации WMO (2008).

Влияние на поле ветра предметов, расположенных поблизости от осадкомерного пункта, может приводить к регистрации локальных излишков или дефицита осадков в месте расположения осадкомера. Желательно, чтобы никакие объекты не находились от осадкомера на расстоянии, меньшем их удвоенной высоты над отверстием осадкомера. Для каждого осадкомерного пункта следует рассчитать среднюю угловую высоту препятствий и составить план пункта. Следует избегать установки осадкомеров на наклонной поверхности или на крыше здания. Пункты, выбранные для измерения количества выпавшего снега и/или высоты снежного покрова, следует располагать в местах, возможно более защищенных от ветра. Наилучшие места для расположения осадкомерных пунктов часто находятся на лесных полянах или в садах, среди деревьев, в кустарниковом редколесье или там, где другие объекты представляют собой эффективную защиту от ветра со всех направлений.

Однако воздействие ветра и влияние места размещения прибора на степень этого воздействия можно уменьшить, используя для измерения жидких осадков осадкомер, расположенный на уровне поверхности земли, или заставив поток воздуха проходить горизонтально над приемным отверстием осадкомера при помощи следующих методов (перечислены в порядке уменьшения их эффективности):

- a) в районах с однородной густой растительностью; высоту растительности при помощи регулярного подрезания следует поддерживать таким образом, чтобы она равнялась высоте приемного отверстия осадкомера;
- b) в других районах следует стимулировать эффект, описанный в пункте (a), путем применения соответствующих ограждений, таких как используемых для DFIR;
- c) следует использовать ветровую защиту вокруг осадкомера.

Поверхность, окружающая осадкомер, может быть покрыта низкой травой, гравием или галькой, но необходимо избегать твердых гладких покрытий, таких как бетон, с целью предотвращения излишнего попадания брызг в осадкомер.

Классификация мест размещения прибора для производства измерений была разработана для того, чтобы дать количественную оценку и задокументировать влияние окружающей осадкомер среды (см. настоящий том, глава 1, приложение 1.D). В этой классификации используется относительно простое описание (наземных) мест размещения.

6.3 НЕРЕГИСТРИРУЮЩИЕ ОСАДКОМЕРЫ

6.3.1 Обычные осадкомеры

6.3.1.1 Приборы

Повсеместно используемый осадкомер состоит из коллектора, помещенного над воронкой, соединенной с контейнером, в котором вода или растаявший снег накапливаются и хранятся между сроками наблюдений. Как показано на рисунке 6.1, в мире используются осадкомеры различной формы. Там, где твердые осадки выпадают часто и в большом количестве, для повышения точности измерений используется ряд специальных модификаций. Такие модификации включают удаление воронки дождемера перед началом снежного сезона или применение специального снегозадерживающего щита (см. WMO, 1998) для защиты от выдувания снега. Ветровая защита вокруг осадкомера уменьшает ошибку, обусловленную деформацией поля ветра над осадкомером и задуванием снега в осадкомер. Она рекомендована для измерения количества осадков и необходима для измерения количества выпавшего снега. Используемые осадкомеры весьма разнообразны по конструкции (см. WMO, 1989a).

Накопленная вода либо собирается в измерительном сосуде, либо переливается из контейнера в измерительный сосуд, либо ее уровень в контейнере измеряется непосредственно с помощью проградуированной рейки. Размер приемного отверстия коллектора не оказывает существенного влияния на измерение жидких осадков, но если ожидается значительное количество твердых осадков, то площадь отверстия

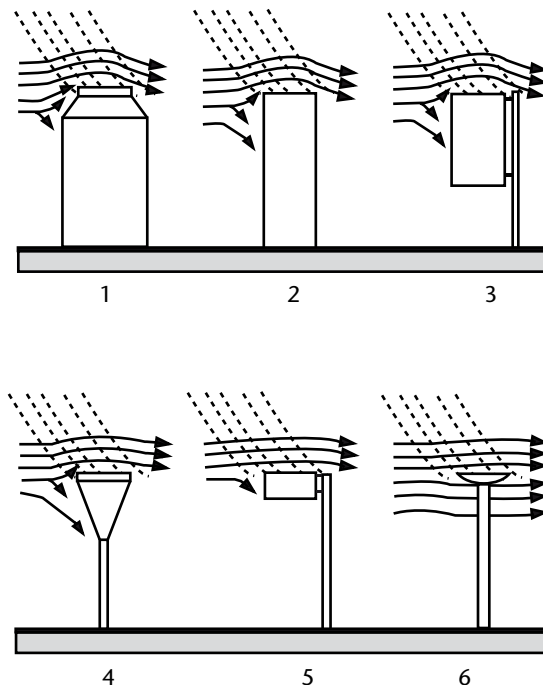


Рисунок 6.1. Различные формы стандартных осадкомеров. Сплошными линиями показаны воздушные потоки и пунктирными линиями показаны траектории движения частиц, образующих осадки. Первый прибор показывает самую сильную деформацию ветрового поля над приемным отверстием осадкомера, а последний прибор — наименьшую. Соответственно, поправка на влияние ветра для первого прибора больше, чем для последнего осадкомера.

должна составлять по меньшей мере 200 см^2 . Площадь от 200 до 500 см^2 будет, вероятно, наиболее подходящей. Основные требования, предъявляемые к осадкомеру, сводятся к следующему:

- a) ободок коллектора должен иметь острый край и быть строго вертикальным внутри и пологим снаружи; конструкция осадкомеров для измерения количества снега должна быть такой, чтобы сужение приемного отверстия из-за скопления мокрого снега вокруг ободка не могло быть значительным;
- b) площадь приемного отверстия должна быть известна с точностью до $0,5 \%$, и конструкция осадкомера должна быть такой, чтобы эта площадь оставалась постоянной при обычном использовании осадкомера;
- c) коллектор должен быть сконструирован таким образом, чтобы осадки не выбрызгивались изнутри наружу и чтобы брызги не попадали внутрь. Этого можно достичь, если вертикальная стенка достаточно высока и наклон воронки достаточно пологий (по крайней мере 45%). Подходящее устройство коллекторов показано на рисунке 6.2;
- d) конструкция должна быть такой, чтобы свести к минимуму потери на смачивание. Этого можно достичь путем выбора подходящего материала и сведения к минимуму суммарной внутренней поверхности коллектора;
- e) входное отверстие контейнера должно быть узким, и контейнер должен быть в достаточной мере защищен от воздействия солнечных лучей, чтобы свести до минимума потери на испарение. Осадкомеры, используемые в местах, где целесообразно снимать показания прибора один раз в неделю или месяц, должны быть аналогичными по конструкции осадкомерам, применяемым для суточных измерений, но с контейнером большей емкости и более прочной конструкции.

Мерный стакан должен изготавливаться из прозрачного стекла или пластика с подходящим коэффициентом теплового расширения и иметь четкую маркировку, указывающую размер или тип осадкомера, с которым его следует использовать. Его диаметр должен составлять не более 33% диаметра приемного отверстия прибора; чем меньше соответствующий диаметр, тем выше точность измерения. Деления следует наносить четко; вообще деления рекомендуется наносить с интервалом $0,2 \text{ мм}$ и четко оцифровывать линии каждого целого миллиметра. Кроме этого, желательно, чтобы была нанесена линия-риска, соответствующая $0,1 \text{ мм}$. Максимальная погрешность градуировки не должна превышать $\pm 0,05 \text{ мм}$ у отметки 2 мм или выше и $\pm 0,02 \text{ мм}$ ниже этой отметки.

Для того чтобы измерить небольшое количество осадков с достаточной точностью, внутренний диаметр мерного стакана должен уменьшаться к основанию. При всех измерениях уровень воды определяется по нижнему краю мениска, и при снятии

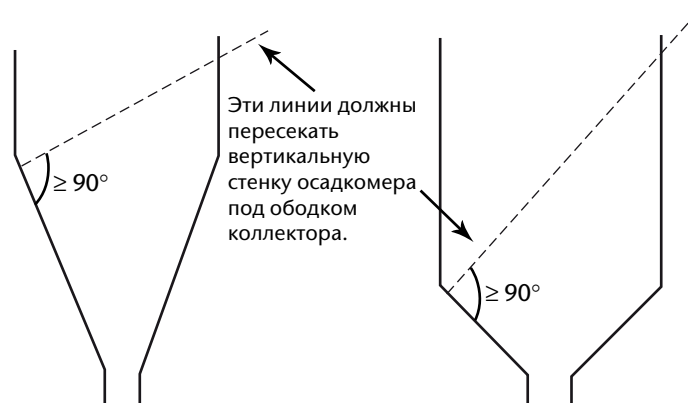


Рисунок 6.2. Подходящее устройство коллектора осадкомеров

показаний мерный стакан следует держать вертикально во избежание ошибок параллакса. Нанесение основных градуировочных линий на внутреннюю сторону стакана также помогает уменьшить такие ошибки.

Мерные рейки следует изготавливать из кедра или другого подходящего материала, который слабо поглощает воду и имеет незначительный коэффициент капиллярности. Деревянные мерные рейки непригодны, если в коллектор для уменьшения испарения добавлено масло. В этом случае рекомендуется использовать рейки из металла или других материалов, с которых масло легко удаляется. Неметаллические рейки во избежание быстрого износа должны быть снабжены латунным наконечником и градуироваться в соответствии с соотношением площадей поперечного сечения приемного отверстия осадкомера и коллектора; деления должны наноситься, по крайней мере, через каждые 10 мм, и следует предусматривать поправку на вытеснение жидкости самой мерной рейкой. Максимальная ошибка градуировки мерной рейки не должна превышать $\pm 0,5$ мм в любой точке. Измерения, проводимые при помощи мерной рейки, рекомендуется, где это возможно, проверять по мерному стакану.

6.3.1.2 **Эксплуатация**

При снятии показаний наблюдатель должен держать мерный стакан вертикально во избежание ошибок параллакса. Снег, накопленный в нерегистрирующих осадкомерах, должен либо взвешиваться, либо растапливаться сразу после каждого наблюдения, а затем измеряться с использованием стандартного градуированного мерного стакана. Количество собранных осадков можно также измерять точным взвешиванием. Этот метод имеет некоторые преимущества. Определяется общая масса мерного сосуда и его содержимого, затем вычитается масса сосуда, которая известна заранее. В этом случае возможность разлить воду маловероятна, и любое количество жидкости, оставшееся в мерном сосуде, включается в эту массу. Однако обычно используемые (объемные) методы являются более простыми и дешевыми.

6.3.1.3 **Калибровка и техническое обслуживание**

Градуировка мерного стакана или рейки должна, разумеется, соответствовать выбранному размеру коллектора. Поэтому калибровка осадкомера включает проверку диаметра приемного отверстия осадкомера: следует обеспечить, чтобы он находился в пределах разрешаемого допуска. Калибровка также включает в себя объемные проверки мерного стакана и рейки. Для измерений, основанных на весовых единицах, требуется регулярная калибровка весов.

Регулярное техническое обслуживание должно включать в себя поддержание в любое время уровня осадкомера для предотвращения нарушения его горизонтальности (см. Rinehart, 1983; Sevruk, 1984). Согласно требованиям, периодически следует чистить внешний контейнер осадкомера (как внутри, так и снаружи) и градуировку с помощью щетки с длинной ручкой и мыльной воды, после чего производится ополаскивание чистой водой. Изношенные, поврежденные или сломанные части должны по необходимости заменяться. Растительность вокруг осадкомера должна подрезаться на высоте 5 см (где это применимо). Следует проверять и фиксировать местоположение с точки зрения подверженности внешним воздействиям.

6.3.2 **Суммарные осадкомеры**

Суммарные осадкомеры используются для измерений общего сезонного количества осадков в отдаленных и малонаселенных районах. Такие осадкомеры состоят из коллектора, помещенного над воронкой, соединенной с контейнером, объем которого достаточен для того, чтобы вместить сезонный сбор (или месячный сбор в районах с повышенной влажностью). Для уменьшения испарения в контейнер необходимо

налить слой подходящего масла толщиной не менее 5 мм или другого вещества, препятствующего испарению (WMO, 1972). Осадки должны иметь возможность свободно попадать в раствор, находящийся под этим слоем.

В контейнер может быть налит раствор антифриза для превращения снега, попадающего в осадкомер, в жидкость. Важно, чтобы раствор антифриза оставался диспергированным. Смесь, состоящая на 37,5 % по массе из технического хлористого кальция (степень чистоты 78 %) и на 62,5 % из воды, образует удовлетворительный раствор антифриза. В качестве альтернативы используются водные растворы этиленгликоля или 1,2-пропиленгликоля. Не рекомендуется использовать компоненты антифриза с опасными свойствами (считаются опасными грузами для перевозки или опасными материалами при обращении), такие как компоненты, содержащие метанол, опасный материал, классифицированный как (высокотоксичный). Настоятельно рекомендуется внимательно ознакомиться с паспортом безопасности, также называемым паспортом безопасности материалов. Эти документы предоставляются производителем и содержат всю необходимую информацию о составе, свойствах, потенциальной опасности, мерах безопасности, обращении и хранении материала.

Хотя эти растворы более дорогостоящие, они в меньшей степени вызывают коррозию, чем хлористый кальций, и предохраняют от замерзания при большей степени разбавления, которое происходит в результате последующего попадания осадков. Объем раствора, первоначально помещаемого в контейнер, не должен превышать 33 % общего объема осадкомера.

В некоторых странах такой раствор антифриза и масла считается токсичным отходом и, следовательно, представляет угрозу для окружающей среды. Рекомендации по удалению токсичных веществ следует получить у местных органов по охране окружающей среды.

Сезонный сбор осадков определяется путем взвешивания или измерения объема содержимого контейнера (как для обычных осадкомеров; см. 6.3.1). Следует точно учитывать количество масла и антифриза, помещенных в контейнер в начале сезона, и любое уменьшение его объема при проведении объемных измерений. Поправки могут вводиться те же, что и в случае обычных осадкомеров.

Функционирование и техническое обслуживание суммарных осадкомеров в отдаленных районах создает ряд проблем, таких как занесение прибора снегом, трудность в установке осадкомера в местах, удобных для снятия показаний и т. д., которые требуют специального контроля. Особенно большое внимание следует уделять оценке качества данных, полученных с помощью таких осадкомеров.

6.4 ПОГРЕШНОСТИ И ПОПРАВКИ ПРИ ИЗМЕРЕНИИ КОЛИЧЕСТВА ОСАДКОВ

На этом этапе уместно описать погрешности и поправки, которые касаются в определенной степени большинства осадкомеров, будь то регистрирующие или нерегистрирующие приборы. Особые случаи, касающиеся регистрирующих приборов, описаны в 6.5.

Всестороннее описание погрешностей и поправок можно найти в публикациях WMO (1982, 1984, 1986; конкретно для снега в публикации 1998; и конкретно для интенсивности дождевых осадков 2006, 2009). Подробные сведения о моделях, используемых для коррекции необработанных данных об осадках в Канаде, Дании, Финляндии, Швейцарии, Российской Федерации и США, приводятся в публикации WMO (1982). В публикации WMO (1989a) описывается происхождение погрешностей. В публикациях WMO (1986, 1989b) собраны доклады конференций по этой теме. Подробное рассмотрение вопроса о повышении надежности измерений интенсивности дождевых осадков, полученных

с помощью традиционных плювиографов с самоопорожняющимся контейнером, весовых плювиографов и других типов осадкомеров (оптических, поплавковых/сифонных и т. д.), приводится в публикациях WMO (2006, 2009).

Количество осадков, измеряемых при помощи повсеместно используемых осадкомеров, может быть меньше фактического количества осадков, достигающих поверхности земли, и эта разница может достигать 30 % и более. Систематические потери изменяются в зависимости от типа осадков (снег, снег с дождем и дождь) и скорости ветра. Систематическая погрешность измерений твердых осадков, как правило, велика и может на порядок превышать величину погрешности, обычно характерной для измерения жидких осадков.

Для многих гидрологических целей необходимо сначала произвести коррекцию данных с учетом погрешностей, прежде чем делать расчеты. Такая коррекция, конечно, не может быть точной (и даже может увеличить погрешность). Поэтому исходные данные рекомендуется хранить в основном архиве как для того, чтобы поддерживать целостность данных, так и для того, чтобы иметь наилучшую основу для проведения более совершенной коррекции в будущем, если это будет возможно.

Традиционная оценка погрешностей в осадкомерах относится к так называемым погрешностям метеорологического характера. Общепринято, что измерение жидких осадков на уровне земли подвержено воздействию различных источников систематических и случайных ошибок, главным образом обусловленных потерями за счет ветра, смачивания и испарения (см. WMO, 1982), которые приводят к сомнительной надежности измерений слабых и умеренных дождевых осадков в отсутствие точной калибровки. Погрешности на ветер все еще оказывают влияние на измерение интенсивности дождевых осадков величиной порядка $20\text{--}50\text{ мм}\cdot\text{ч}^{-1}$ с частотой числа случаев около 5 % наблюдений на некоторых станциях взаимного сравнения в центральной Европе (WMO, 1984). Признается также, что погрешность пробоотбора вследствие дискретной природы измерения количества дождевых осадков зависит от размера контейнера (для плювиографов с самоопорожняющимся контейнером) и интервала пробоотбора или инерции прибора, но не от интенсивности осадков, и может быть вычислена аналитически (Colli et al., 2013a).

Истинное количество осадков рекомендуется оценивать с учетом поправок, принимая во внимание некоторые или все причины возникновения погрешностей, перечисленных ниже:

- a) погрешность из-за систематической деформации поля ветра над приемным отверстием осадкомера: как правило, составляет 2–10 % в случае дождя и 10–50 % в случае снега;
- b) погрешность из-за потерь на смачивание внутренних стенок коллектора;
- c) погрешность из-за потерь жидкости, остающейся в контейнере при его опорожнении: обычно 2–15 % летом и 1–8 % зимой для (b) и (c) вместе взятых;
- d) погрешность из-за испарения жидкости из контейнера (особенно важна для мест с жарким климатом): 0–4 %;
- e) погрешность из-за низовой метели и поземки;
- f) погрешность из-за попадания брызг в контейнер и выбрызгивания воды из контейнера: 1–2 %;
- g) систематические механические погрешности и погрешности пробоотбора, погрешности динамических воздействий (например, систематическая задержка из-за инерции прибора): как правило, 5–15 % для интенсивности дождевых осадков или даже больше при интенсивных явлениях (см. WMO, 2009);

- h) случайные ошибки наблюдений и погрешности приборов, включая некорректное время считывания показаний осадкомера.

Первые семь компонентов погрешности носят систематический характер и перечислены в порядке их значимости. Суммарная погрешность из-за низовой метели и поземки и из-за выбрызгивания воды из контейнера и попадания брызг в контейнер быть может как положительной, так и отрицательной, в то время как систематические погрешности, возникающие из-за деформации поля ветра и других факторов, являются отрицательными. Поскольку погрешности, указанные выше в пунктах (е) и (ф), как правило, количественно оценить трудно, общая модель для коррекции данных большинства осадкомеров, первоначально предложенная в публикации WMO (1982) и позже преобразованная в работе Legates and Willmott (1990), может быть записана как:

$$P_k = k_r P_{cr} + k_s P_{cs} = k_r (P_{gr} + \Delta P_{1r} + \Delta P_{2r} + \Delta P_{3r} + \Delta P_{4r}) + k_s (P_{gs} + \Delta P_{1s} + \Delta P_{2s} + \Delta P_{3s} + \Delta P_{4s}) \quad (6.1)$$

где подстрочные r и s относятся соответственно к жидким (дождь) или твердым (снег) осадкам; P_k — скорректированное количество осадков; k (см. рисунок 6.3) — поправочный коэффициент для учета влияния деформации поля ветра; P_c — количество осадков, собранных в коллекторе прибора; P_g — измеренное количество осадков в осадкомере; ΔP_1 — поправка на потерю жидкости за счет смачивания внутренних стенок коллектора; ΔP_2 — поправка на потерю жидкости, остающейся в контейнере после его опорожнения; ΔP_3 — поправка на испарение из контейнера и ΔP_4 — поправка на систематическую механическую погрешность.

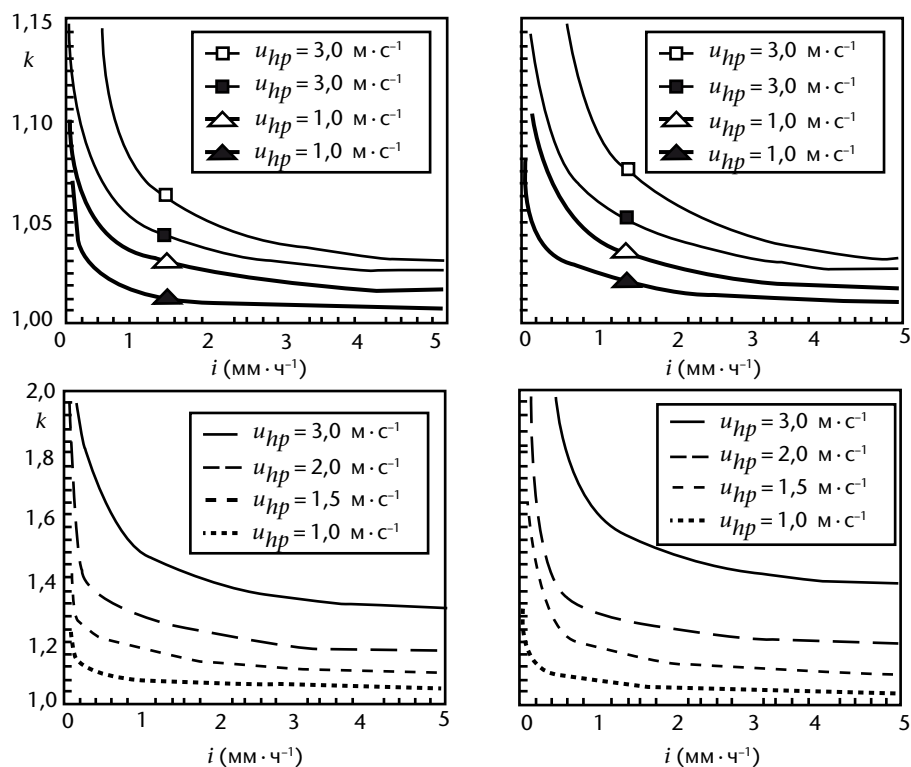


Рисунок 6.3. Коэффициент перехода k определяется соотношением «истинного» значения к измеренной величине осадков для дождя (вверху) и снега (внизу) для двух незранированных осадкомеров в зависимости от скорости ветра u_{hp} , интенсивности i и типа метеорологической обстановки по Nespor and Sevruk (1999). Слева показаны значения для ручного стандартного осадкомера Германа Хелмана, а справа график для пювиографа с самоопорожняющимся контейнером Ламбрехта. Незакрашенные обозначения вверху диаграммы относятся к орографическому дождю, а закрашенные черным обозначения к ливневым осадкам. Обратите внимание на разные шкалы для дождя и снега. Для экранированных осадкомеров k может быть меньше: до 50–70 % для снега и смешанных осадков соответственно (WMO, 1998). Потери на тепло не представлены на этой диаграмме (в Швейцарии они изменяются с изменением высоты между 10 % и 50 % от измеренных значений свежеснега).

Погрешности на метеорологические условия для коллектора, а также погрешности на смачивание, разбрызгивание и испарение обычно рассматриваются как погрешности водосбора. Они указывают на способность прибора собирать точное количество воды в соответствии с определением осадков на уровне земли, что подразумевает общее количество воды, выпадающей над проекцией площади коллектора над землей. Систематические механические погрешности и погрешности пробоотбора, обычно относимые к количественным погрешностям, указывают на способность прибора точно обнаруживать количество воды, собираемой прибором. Лабораторные и полевые взаимные сравнения ВМО измерений интенсивности дождевых осадков осадкомерами (WMO, 2006, 2009) внесли вклад в оценку количественных погрешностей и позволили задокументировать проведение лабораторных и полевых методов калибровки для выявления и/или корректировки количественных погрешностей при измерении интенсивности дождевых осадков. Очевидно, что эти погрешности могут быть производными от очень разных аспектов на этапе обнаружения осадков, поскольку приборы могут различаться по применяемым принципам измерения, конструктивным особенностям, эксплуатационным решениям и так далее.

Поправки на погрешности измерения осадков вводятся для суточных и месячных сумм осадков, а иногда и для отдельных случаев измерения количества осадков.

При проведении измерений интенсивности осадков систематические механические погрешности могут быть точно откорректированы с помощью стандартизированной лабораторной калибровки, именуемой динамической калибровкой в неизменных устойчивых условиях эталонной скорости потока (Niemczynowicz, 1986; WMO, 2009). Более подробная информация представлена в приложении 6.C.

Вообще, для выполнения коррекции, относящейся к метеорологическим условиям, необходимы вспомогательные данные, в частности скорость ветра над приемным отверстием осадкомера во время выпадения осадков, размер капель, интенсивность выпадения осадков, температура и влажность воздуха и характеристики места установки осадкомера. Хотя температура воздуха и оказывает некоторое воздействие на занижение количества осадков, попадающих в контейнер осадкомера, это воздействие не такое значительное, как воздействие скорости ветра на высоте установки прибора (Yang et al., 1993; Yang et al., 1995). Скорость ветра, тип осадков или их интенсивность могут быть достаточными параметрами для определения поправок. Иногда используется только скорость ветра. На постах, где такие наблюдения не проводятся, для выполнения коррекции можно использовать данные, полученные путем интерполяции данных наблюдений с соседних станций, но делать это надо с осторожностью и только для месячных сумм осадков.

Для большинства осадкомеров наиболее важным фактором окружающей среды, приводящим к занижению результатов измерений твердых осадков, является скорость ветра. Данные о ветре с целью проведения суточной коррекции следует получать путем стандартных метеорологических наблюдений на станции. В отдельных случаях, когда скорость ветра не измеряется на высоте приемного отверстия осадкомера, ее можно привести к этой высоте, используя процедуру получения средней скорости ветра, зная шероховатость окружающей поверхности и угловую высоту окружающих препятствий. Предлагаемая схема показана в приложении 6.D.¹ Эта схема во многом зависит от конкретного пункта, причем оценка требует хорошего знания местоположения конкретной станции и прибора. Защищенные осадкомеры улавливают больше осадков, чем незащищенные, особенно в случае твердых осадков. Поэтому осадкомеры следует защищать либо естественным образом (например, вырубка леса), либо искусственно (например, защита Альтера, канадская защита Нифера, ветровая защита Третьякова) для сведения к минимуму неблагоприятного влияния скорости ветра на измерения твердых осадков (информацию о конструкциях защиты можно найти в публикациях WMO, 1998, 2008). От типа конфигурации ветровой защиты и от типа осадкомера зависит взаимосвязь между скоростью ветра и эффективностью улавливания осадков и однородность полученных данных.

¹ Схема приведения скорости ветра рекомендована КПМН на одиннадцатой сессии (1994 г.).

Потери на смачивание (Sevruk, 1974a) являются еще одной кумулятивной систематической погрешностью ручных измерений, которая варьирует в зависимости от типа осадков и осадкомера; ее величина также зависит от того, сколько раз опустошался контейнер. В среднем потери на смачивание могут составить до 0,2 мм на наблюдение. На синоптических станциях, где осадки измеряются каждые 6 часов, это может привести к очень серьезным потерям. В некоторых странах, согласно расчетам, потери на смачивание достигают 15–20 % количества измеренных зимних осадков. Приемлемой альтернативой является поправка на потерю жидкости за счет смачивания во время измерения. Потери на смачивание могут оставаться низкими в хорошо спроектированном осадкомере. Для определения потерь на смачивание при использовании ручных осадкомеров достаточно методики (WMO, 1998). Рекомендуется, чтобы величина потерь на смачивание периодически пересматривалась (например, каждые 5 лет), так как зачастую она меняется по мере старения коллектора. Внутренние поверхности должны изготавливаться из материала, который может оставаться гладким и чистым; например, покрытие краской неприемлемо, но прошедшая термообработку эмаль удовлетворяет поставленным условиям. Соединительные швы в конструкции должны быть сведены к минимуму.

Потери на испарение (Sevruk, 1974b) варьируют в зависимости от типа осадкомера, климатической зоны и времени года (сезоны, упомянутые ниже, соответствуют северному полушарию). Потери на испарение являются проблемой осадкомеров, которые не имеют предохранительной воронки в контейнере, особенно поздней весной в средних широтах. Сообщается о потерях, превышающих 0,8 мм в сутки. Потери зимой гораздо ниже, чем в летние месяцы, и составляют от 0,1 до 0,2 мм в сутки. Однако эти потери являются кумулятивными. В хорошо спроектированном осадкомере воздействию испарения подвержена лишь небольшая поверхность воды, ее вентиляция сведена до минимума, а температура воды удерживается низкой с помощью отражающей внешней поверхности. При использовании суммарных и накопительных регистрирующих осадкомеров, погрешности, связанные с испарением, фактически можно устранить, если в коллекторе использовать масло.

Ясно, что для достижения сопоставимости данных при использовании различных типов осадкомеров и защиты при всех погодных условиях в фактические измерения необходимо вводить поправки. Во всех случаях, когда измерения количества осадков корректируются с целью уменьшения погрешности, настоятельно рекомендуется публиковать как измеренные, так и скорректированные значения.

6.5 ПЛЮВИОГРАФЫ

Преимущество автоматической регистрации количества осадков заключается в том, что она может обеспечить лучшее временное разрешение, чем ручные измерения, и имеется возможность сократить потери на испарение и смачивание. Разумеется, такие измерения тоже подвержены влиянию ветра, описанному в 6.4.

Широко применяются три типа плювиографов: весовой, с самоопорожняющимся контейнером и поплавковый. Из этих трех типов только весовой подходит для измерения всех видов осадков, в то время как два других в основном используются для измерения жидких осадков. Существует также несколько других автоматических плювиографов, в которых нет движущихся частей. В этих осадкомерах используются такие устройства, как емкостные датчики, датчики давления, акустические и оптические датчики, или небольшие радиолокационные устройства для выработки электрического сигнала, пропорционального эквиваленту осадков. Очень важным компонентом плювиографа являются часы, позволяющие определить периоды времени, в которые производились записи, и проставлять даты записей.

Из-за высокой изменчивости интенсивности осадков, измеряемой за срок свыше 1 минуты, единичное одномоментное значение интенсивности дождевых осадков не является репрезентативным для более продолжительных периодов времени. Поэтому интенсивность дождевых осадков за 1 минуту не должна использоваться при схеме

пробоотбора по срокам, например одно синоптическое измерение каждый час или три часа. Очень хорошая синхронизация по времени, не менее 10 с, требуется между эталонным временем и различными приборами наблюдательной станции.

6.5.1 **Весовой плювиограф**

6.5.1.1 **Приборы**

В приборах этого типа вес контейнера вместе с накопленными в нем осадками непрерывно регистрируется с помощью пружинного механизма, системы балансировочных весов или вибрационных проволочных датчиков и тензодатчиков. Таким образом, записывается общая масса осадков, как жидких, так и твердых, по мере их выпадения. Обычно приборы этого типа не имеют приспособления для удаления из них собранных осадков; их емкость (т. е. максимальное количество накопленных осадков между перезаправками) колеблется от 250 до 1 500 мм в зависимости от модели. Модели с малой емкостью не должны использоваться в районах, где может отмечаться максимальное накопление осадков за короткий период времени. Такие приборы следует обслуживать так, чтобы свести потери от испарения к минимуму, чего можно достичь путем добавления в контейнер достаточного количества масла или другого вещества, препятствующего испарению, для создания пленки на поверхности воды. Колебание весов во время сильных ветров, затрудняющее снятие показаний, можно уменьшить при помощи специального программирования микропроцессора для устранения влияния этих колебаний на показания прибора. Такие весовые плювиографы особенно полезны для регистрации осадков в виде снега, града и смеси снега с дождем, так как для записи количества твердых осадков их не нужно растапливать. Для работы зимой контейнер-накопитель заправляется раствором антифриза (см. 6.3.2) для растапливания твердых осадков. Количество антифриза зависит от ожидаемого количества осадков и минимальной температуры, предполагаемой во время минимального разбавления. Эти приборы не используют никаких движущихся механических частей в механизме взвешивания; используются только эластичные деформации частей. Поэтому значительно уменьшается потребность в обслуживании прибора, не имеющего механического износа деталей.

Цифровой выходной сигнал обычно усредняется и фильтруется. Интенсивность осадков также может быть рассчитана по разнице между двумя или более последовательными весовыми измерениями. Точность такого рода осадкомеров непосредственно связана с их характеристиками измерения и/или регистрации, которые могут меняться в зависимости от завода-изготовителя.

Многие приборы имеют выходные данные, содержащие диагностические параметры, которые очень полезны для последующей оценки данных измерений и для контроля качества данных (КК).

Технология взвешивания в сочетании с самоопорожняющимся контейнером обеспечивает высокое разрешение и высокую точность измерений при очень небольшом объеме конструкции. Этот тип прибора измеряет вес воды в самоопорожняющемся контейнере объемом до 20 мл и может определять меньшее количество осадков по сравнению с «классическими» плювиографами с самоопорожняющимся контейнером (см. 6.5.2).

6.5.1.2 **Погрешности и поправки**

За исключением погрешности за счет потерь на смачивание контейнера после опорожнения для весовых плювиографов характерны остальные источники погрешностей, описанные в 6.4. Кроме того, следует отметить, что сами по себе автоматические плювиографы не позволяют определить тип осадков. Существенной проблемой для этого типа осадкомеров являются такие осадки, как, например замерзающий дождь или влажный снег, которые могут прилипнуть к внутренней поверхности приемного отверстия осадкомера и попасть внутрь контейнера только некоторое время спустя. Это серьезно ограничивает способность весовых плювиографов

точно определять время выпадения осадков. Другим общим недостатком весовых pluviографов является раскачивание под влиянием ветра. Это обычно происходит при сильных ветрах, когда турбулентные воздушные потоки над накопительным контейнером и вокруг него вызывают колебания весового механизма. Погрешности, связанные с такими аномальными показаниями, могут быть сведены к минимуму путем осреднения показаний за короткие временные интервалы, обычно за период от 1 до 5 мин. Погрешности в работе часов прибора могут привести к тому, что периоды времени, в которые осуществлялся сбор осадков, и даты сбора осадков будут определены неправильно. Некоторые весовые pluviографы также могут проявлять некоторую температурную чувствительность в механизме взвешивания, что добавляет одну составляющую к результату, которая пропорциональна суточному температурному циклу.

Использование весовых pluviографов позволяет исключить или, по крайней мере, свести к минимуму некоторые потенциальные погрешности, обусловленные измерением осадков вручную. Сводятся к минимуму случайные погрешности измерений, связанные с ошибками наблюдателя, а также определенные систематические погрешности, особенно за счет потерь на испарение и смачивание. В некоторых странах при наблюдении следов осадков количеству осадков официально придается значение нуль, что приводит к смещению в сторону недооценки суммарных сезонных осадков. Эта проблема сводится к минимуму путем применения весовых pluviографов, поскольку даже при очень небольшом количестве осадки накапливаются со временем.

Основной характеристикой весового pluviографа при измерении интенсивности осадков является его инерционность (включая процесс фильтрации), которая приводит к погрешности измерений (систематическая задержка). Время отклика, приведенное в руководстве по эксплуатации или определенное в процессе предыдущего взаимного сравнения ВМО (WMO, 2009), составляет примерно от шести секунд до нескольких минут, в зависимости от устройства и модели прибора. Одноминутное разрешение величины интенсивности осадков, измеряемых весовыми pluviографами, может сильно отличаться от прибора к прибору и зависит от разрешения преобразователя. Такие осадкомеры могут также обнаруживать ограничение или избирательные пороговые величины для определения интенсивности осадков.

Внесение поправок в данные весовых pluviографов на ежечасной или ежесуточной основе может быть более трудной задачей, чем на основе более длительных периодов времени, например для месячных климатических сводок. Дополнительные данные с АМС, такие как скорость ветра на высоте установки осадкомера, температура воздуха, погода в срок наблюдения или высота снежного покрова, будут полезными для точной интерпретации и коррекции результатов измерений количества осадков с помощью автоматических осадкомеров.

6.5.1.3 ***Калибровка и техническое обслуживание***

Весовые pluviографы, как правило, имеют не много движущихся частей и поэтому не требуют частой калибровки. Калибровка обычно предусматривает использование разновесов, которые помещаются в контейнер или контейнер-накопитель и представляют собой заранее определенные эквиваленты количества осадков. Калибровка обычно должна проводиться в лаборатории согласно инструкциям завода-изготовителя.

В приложении 6.С приводится альтернативная процедура калибровки весовых pluviографов, применяемых для измерения интенсивности осадков. Эта калибровка, называемая динамической калибровкой в неизменных устойчивых условиях эталонной скорости потока, проводится для оценки погрешности измерений весовыми осадкомерами. Эта процедура также может использоваться для оценки динамического отклика весового осадкомера путем проведения классической проверки отклика прибора на ступенчатое воздействие с помощью сравнения прибора с эталонной скоростью потока, показывающего разовое скачкообразное изменение от нуля до скорости потока, эквивалентной дождевым осадкам. Кроме того, повторение динамической калибровки в неустойчивых условиях (меняющаяся со временем эталонная скорость потока для

имитации реальных природных явлений) позволяет более точно откалибровать весовые осадкомеры (особенно для определения систематической задержки, вызванной инерционностью прибора) и может привести к улучшению динамических рабочих характеристик и точности измерений в реальных условиях работы (Colli et al., 2013b).

Регулярное техническое обслуживание должно проводиться каждые 3 или 4 месяца в зависимости от условий выпадения осадков на осадкомерном посту. Необходимо обследовать осадкомер как снаружи, так и изнутри, на предмет незакрепленных или сломанных частей и проверки горизонтальности расположения прибора. Результаты любого ручного считывания показаний прибора должны сверяться с записью данных на сменном носителе на предмет сопоставимости до того, как запись будет удалена и аннотирована. Самоопорожняющийся контейнер или контейнер-накопитель должны быть опорожнены, обследованы, очищены, если требуется, и заправлены маслом для измерения только дождевых осадков либо антифризом и маслом, если ожидаются твердые осадки (см. 6.3.2). Регистрирующее устройство должно быть установлено на ноль с тем, чтобы максимально использовать диапазон измерений. Объем цифровой памяти, а также источник энергии должны быть проверены и при необходимости их следует заменить. Необходимо проверять периоды времени и даты, в которые производилась запись.

В рамках обслуживания и проверки прибора следует также проводить на регулярной основе надлежащую калибровку в полевых условиях и проверку калибровки или проверку в полевых условиях, принимая во внимание ограничения, накладываемые местом установки прибора и его рабочими характеристиками. Для измерения интенсивности дождевых осадков осадкомерами в приложении 6.E приводятся рекомендованные процедуры проверки с помощью портативного прибора с эталонной скоростью потока.

6.5.2 Плювиограф с самоопорожняющимся контейнером

Плювиограф с самоопорожняющимся контейнером пригоден для измерения общего количества накопленных осадков и интенсивности дождя. Следует применять подходящие поправки на интенсивность осадков (см. 6.5.2.2) для повышения точности измерения интенсивности и компенсирования занижения интенсивности в случае высокой интенсивности дождевых осадков и переоценки интенсивности в случае слабой интенсивности дождя; оба случая являются типичными примерами некорректных показаний плювиографа с самоопорожняющимся контейнером.

6.5.2.1 Приборы

Принцип действия такого прибора прост. Плювиограф с самоопорожняющимся контейнером использует металлический или пластиковый челнок, разделенный на два отделения, которые находятся в неустойчивом равновесии относительно горизонтальной оси для измерения поступающей в них воды в равновесных порциях. Когда один челнок наполняется водой, его центр массы оказывается вне центра вращения и баланс изменяется, в результате чего сливается собранная вода, и другой челнок приводится в положение для сбора осадков. Отделения челнока имеют такую форму, что вода вытекает из того из них, которое находится в данный момент ниже. Масса воды, содержащейся в челноке, является постоянной величиной (m (г)), поэтому используя плотность воды ($\rho = 1$ г/см³), соответствующий объем (V (см³)) определяется по весу воды и, следовательно, соответствующая высота (h (мм)) накопленной воды извлекается расчетами из используемой площади коллектора (S (см²)). Уравнение:

$$V = m/\rho = h \cdot S \quad (6.2)$$

Таким образом, используя плотность воды рассчитывается h , где 1 мм соответствует 1 г воды на площади 10 см². Для того чтобы иметь подробную запись измерения осадков, количество дождевых осадков не должно превышать 0,2 мм. Для площади осадкомера, равной 1 000 см², эта величина соответствует 20 г воды, содержащейся в челноке.

В плювиографах с самоопорожняющимся контейнером используется замыкание контакта (геркон или контакт реле), так что каждый наконечник генерирует электрический импульс в виде выходного сигнала. Этот выходной сигнал должен быть записан регистрирующим устройством или АЦП (система регистрации данных оснащена портами считывания геркона). Этот механизм обеспечивает непрерывное измерение без вмешательства человека.

Интенсивность дождевых осадков, получаемая с помощью плювиографа с самоопорожняющимся контейнером, рассчитывается по количеству замыканий контактов в течение периода пробоотбора (обычно 6 с или 10 с) и усредняется за выбранный интервал времени (например за 1 мин). Таким способом каждую минуту получается значение интенсивности осадков, которое представляет интенсивность за последнюю минуту или минуты. Эта схема пробоотбора уменьшает неопределенности усреднения. Кроме того, разрешение интенсивности дождевых осадков зависит от размера челнока и выбранного интервала времени. Например, опрокидываемый объем воды, равный 0,2 мм, соответствует при 1-минутном разрешении интенсивности дождевых осадков, равной $12 \text{ мм} \cdot \text{ч}^{-1}$, что является постоянной величиной в пределах измерений осадкомером, если не применяются поправки в зависимости от интенсивности.

Для того, чтобы челнок наклонился и опрокинулся, необходимо небольшое, но определенное время, и во время первой половины этого движения в то отделение, в котором находится уже вычисленное количество осадков, может попасть еще какое-то их количество. Потери воды во время опрокидывания челнока указывают на систематическую механическую погрешность, которая в большей степени является функцией интенсивности осадков и может быть существенной во время сильного дождя ($> 100 \text{ мм} \cdot \text{ч}^{-1}$). Однако она может быть откорректирована путем использования процедуры калибровки, описанной в приложении 6.С, и применения кривой поправок или алгоритма (см. 6.4). Альтернативный метод состоит в использовании устройства, подобного сифону, у основания воронки для направления воды в челноки с контролируемой скоростью. Это сглаживает очень краткосрочные пики интенсивности. Можно также применить дополнительное устройство для ускорения наклона челнока: по существу, это маленькая лопасть, о которую ударяется вода, вытекающая из коллектора, что придает дополнительное ускорение наклоняющемуся челноку, изменяющееся по мере изменения интенсивности осадков.

Плювиограф с самоопорожняющимся контейнером особенно удобен для АМС, поскольку он легко приспособляется к цифровым методам. Импульсы, вырабатываемые контактным устройством, могут прослеживаться с помощью регистратора данных, предпочтительно включающего регистрацию времени, когда произошло опрокидывание, для того чтобы рассчитать откорректированное значение интенсивности дождевых осадков, которое затем может быть использовано для исправления количества осадков за выбранный период. Он может также использоваться с ленточным самописцем.

6.5.2.2 ***Погрешности и поправки***

Поскольку источники погрешностей плювиографа с самоопорожняющимся контейнером несколько отличаются от источников погрешностей других плювиографов, рекомендуются специальные меры предосторожности и коррекции. Некоторые источники погрешностей перечислены ниже:

- a) потери воды из челнока при его опрокидывании во время сильных осадков; они могут быть значительно уменьшены путем проведения динамической калибровки (см. приложение 6.С) и применения поправки на интенсивность дождя;
- b) при обычной конструкции челнока открытая поверхность воды по отношению к объему довольно велика, поэтому возможны значительные потери из-за испарения, особенно в регионах с жарким климатом. Эта погрешность будет наиболее значительной во время слабого дождя;

- c) прерывистый характер записи может не предоставить удовлетворительных данных во время слабой мороси или очень слабого дождя. В частности, невозможно точно определить время начала и конца выпадения осадков;
- d) вода может прилипнуть к стенкам и к краю челнока, и в результате дополнительная масса укоротит время переворачивания. Испытания с воощенными челноками привели к сокращению на 4 % объемов, необходимых для переворачивания, по сравнению с невоощенными челноками. Объемная калибровка может измениться без поворота калибровочных винтов ввиду изменения смачивания челнока под влиянием окисления поверхности или загрязнения примесями и изменения поверхностного натяжения;
- e) поток воды, падающей из воронки в челнок, может вызвать изменение показаний в сторону увеличения в зависимости от размеров, формы и положения горловины;
- f) прибор особенно подвержен погрешностям в связи с трением в подшипниках и нарушением равновесия челноков, обусловленным негоризонтальным положением прибора;
- g) ограниченная повторяемость различной интенсивности дождевых осадков за интервал времени между опрокидываниями челнока ухудшает измерения вследствие низкой стабильности работы механических частей челнока (например движение челнока); это систематическое механическое воздействие может быть изучено с помощью определенных тестов, записывающих последовательность интервалов времени между опрокидываниями, что делает возможным оценить механическую точность работы челнока (см. Colli et al., 2013b). Такая погрешность может быть уменьшена за счет улучшения качества сборки осадкомера;
- h) погрешность пробоотбора с помощью плювиографа с самоопорожняющимся контейнером (Habib et al., 2001) оказывает дополнительное сильное влияние на работу прибора в полевых условиях при режиме слабых дождевых осадков; эти погрешности выражаются в задержке срабатывания механизма самоопорожнения челнока при определении накопленного количества воды за соответствующий интервал времени; существуют различные методики расчета для уменьшения влияния погрешности пробоотбора и обеспечения измерений интенсивности дождя с более высоким разрешением, чем позволяет чувствительность плювиографа с самоопорожняющимся контейнером (см. Colli et al., 2013a; Stagnaro et al., 2016).

Тщательная калибровка может обеспечить коррекцию систематических частей этих погрешностей. Введенные поправки для улучшения измерений интенсивности дождевых осадков (WMO, 2009) и, следовательно, соответствующее накопленное количество воды выражаются в проведении динамической калибровки и применении кривой поправок (см. 6.4), например, путем применения коррекции с помощью программного обеспечения или алгоритма в системе усвоения данных. В качестве альтернативы они могут задействовать проведение процедуры спрямления в электронной цепи прибора (генерируя эмиссию экстра-импульсов в зависимости от интенсивности осадков) или посредством специального приспособления (например, небольших дефлекторов, стимулирующих динамическое давление, которое увеличивается с возрастанием интенсивности осадков, позволяя опрокидываться челноку до того, как он наполнится водой). В публикации (WMO, 2009) показано, что спрямление электронными экстра-импульсами хорошо подходит для измерения количества осадков и хуже для измерения интенсивности осадков. С другой стороны, механическое спрямление компенсирует потери воды во время движения балансира и существенно минимизирует недооценку интенсивности во время интенсивных осадков. Коррекция с помощью программного обеспечения (кривая поправок или алгоритм) является наиболее эффективным методом для корректировки систематических механических погрешностей. Эксплуатационные характеристики для полевых условий трех различных типов плювиографов с самоопорожняющимся контейнером: без коррекции, с коррекцией с помощью программного обеспечения и с дополнительной импульсной коррекцией в тропических условиях можно найти в работе Chan et al. (2015).

Результаты измерений с помощью плювиографов с самоопорожняющимся контейнером могут быть скорректированы с учетом воздействия факторов места их установки таким же способом, как и для других типов осадкомеров.

В холодное время года, особенно при измерении количества твердых осадков, могут использоваться обогревательные устройства. Однако характеристики подогреваемых плювиографов с самоопорожняющимся контейнером могут быть неудовлетворительными из-за больших погрешностей, обусловленных как ветром, так и испарением растапливаемого снега. Поэтому следует рассматривать другие типы приборов для использования при измерении количества зимних осадков в регионах, где температура опускается ниже 0 °C в течение длительных периодов времени. Однако эффект испарения можно свести к минимуму с помощью приборов с регулируемыми нагревательными элементами, которые поддерживают температуру критических частей немного выше температуры плавления воды.

6.5.2.3 **Калибровка и техническое обслуживание**

Калибровка плювиографа с самоопорожняющимся контейнером обычно выполняется путем пропускания через механизм опрокидывания известного количества воды с различной скоростью и регулирования механизма с учетом известного объема. Эта процедура должна проводиться в лабораторных условиях. Процедура калибровки, рекомендованная для таких плювиографов, описана в приложении 6.С.

В рамках обслуживания и проверки прибора следует также проводить на регулярной основе надлежащую полевую калибровку и проверку полевой калибровки или осмотр прибора в полевых условиях, принимая во внимание ограничения, накладываемые местом установки прибора и его рабочими характеристиками. Для измерения интенсивности дождевых осадков осадкомерами в приложении 6.Е приводятся рекомендованные процедуры проверки с помощью портативного прибора с эталонной скоростью потока.

Ввиду большого числа источников ошибок, характеристики регистрации и калибровка плювиографов с самоопорожняющимися контейнерами представляют собой результат сложного взаимодействия многих параметров. Ежедневные сравнения с эталонным осадкомером могут дать полезные поправочные коэффициенты и являются хорошей практикой. Поправочные коэффициенты могут изменяться от станции к станции. В целом поправочные коэффициенты превышают 1,0 (заниженные показания) при малой интенсивности выпадения осадков и составляют менее 1,0 (завышенные показания) при их большой интенсивности. Зависимость между поправочным коэффициентом и интенсивностью является нелинейной и имеет форму кривой.

Регулярное техническое обслуживание должно включать в себя чистку воронки и челноков от накопившейся грязи и наносов, а также обеспечение горизонтального положения прибора. Весьма рекомендуется ежегодная замена механизма опрокидывания заново откалиброванным устройством. Необходимо проверять даты и периоды времени, в которые производилась запись.

6.5.3 **Поплавковый плювиограф**

В этом типе прибора жидкие осадки попадают в поплавковую камеру, в которой находится легкий поплавок. Когда уровень воды в камере повышается, вертикальное перемещение поплавка при помощи специального механизма приводит в работу перо, которое начинает двигаться по разграфленной бумажной ленте, или цифровое устройство. Можно использовать любой масштаб записи, если соответствующим образом отрегулировать размеры приемного отверстия коллектора, поплавок и поплавковой камеры.

Чтобы произвести запись за какой-либо выбранный период времени (обычно за 24 ч) необходимо иметь или очень большую поплавковую камеру (в этом случае получают сжатый масштаб записи на ленте или на другом средстве записи), или механизм для

быстрого автоматического слива жидкости из поплавковой камеры, как только она наполнится, для того чтобы перо или другой индикатор вернулись к началу отсчета. Для слива осадков обычно используется приспособление сифонного типа. Процесс слива воды следует начинать при точно установленном уровне так, чтобы вода не переливалась через край ни в начале, ни в конце процесса, который не должен занимать больше 15 секунд. В некоторых приборах поплавковая камера устанавливается на рычаге весов с помощью опорных призм для того, чтобы наполненная камера перевешивала; подъем воды облегчает процесс слива, и после того как камера опорожняется, она возвращается в первоначальное положение. Некоторые плювиографы имеют механизм принудительного слива, который позволяет производить его менее чем за 5 секунд. В плювиографе с принудительным сливом есть небольшая камера, отделенная от основной, в которой собираются жидкие осадки, выпадающие в момент слива. Вода из этой камеры поступает в основную камеру, когда прекращается слив, что гарантирует правильность записи общего количества жидких осадков.

Во избежание замерзания воды в поплавковой камере в зимний период в плювиографе должен устанавливаться обогревательный прибор (желательно, чтобы он регулировался термостатом). Это предотвратит порчу поплавка и поплавковой камеры и даст возможность регистрировать количество жидких осадков в зимний период. При наличии сети электропитания достаточно небольшого нагревательного элемента или маломощной электрической лампочки; в противном случае можно использовать другие источники питания. В этих целях удобно использовать короткую спираль, которая наматывается на коллектор и подсоединяется к батарее большой мощности. Количество подаваемого тепла не должно превышать минимума, необходимого только для того, чтобы предотвратить замерзание, так как подача излишнего тепла может понизить точность наблюдений, приводя к вертикальному перемещению воздуха над прибором и увеличению потерь за счет испарения.

В некоторых странах сообщается о существенном занижении показаний незащищенных обогреваемых плювиографов, обусловленном влиянием ветра и испарением растопленного снега, как это наблюдается и для весовых плювиографов (см. 6.5.1.2).

За исключением того, что калибровка выполняется с использованием известного объема воды, техническое обслуживание этого прибора аналогично обслуживанию весового плювиографа (см. 6.5.1.3).

6.5.4 Другие приборы для измерения осадков

С развитием технологий измерения с помощью электронных средств и интеллектуальных измерительных инструментов в последние годы были разработаны другие приборы для измерения осадков. Их эксплуатационные качества примерно такие же, как и у традиционных осадкомеров с самоопорожняющимся контейнером. Однако эти приборы обеспечивают измерения интенсивности дождя с более высоким разрешением по сравнению с классическими методами, начиная с 0,01 мм, и они особенно подходят для труднодоступных районов, поскольку требуют меньшего технического обслуживания. Эти приборы описаны в настоящем томе, глава 14.

6.6 ИЗМЕРЕНИЕ РОСЫ, ОТЛОЖЕНИЯ ЛЬДА И ОСАДКОВ В ВИДЕ ТУМАНА

6.6.1 Измерение росы и увлажненности листа

Выпадение росы — это явление, характерное в основном для ночного времени. Несмотря на то, что количество выпадающей росы относительно невелико и зависит от местности, это явление имеет немаловажное значение в аридных зонах. В очень засушливых районах оно может быть приравнено к дождю. Подверженность листьев деревьев влиянию

жидкой влаги в результате выпадения росы, тумана и осадков также играет важную роль в заболеваемости растений, деятельности насекомых-вредителей, а также для уборки и хранения урожая.

Для того чтобы оценить роль росы в гидрологии, необходимо различать источники ее образования:

- а) нисходящий перенос атмосферной влаги, конденсирующейся на охлажденных поверхностях, известный как выпадение росы;
- б) испарение из почвы и растений влаги, конденсирующейся на охлажденных поверхностях, и известной как дистиллированная роса;
- с) выделение воды листьями, известное как гуттация.

Вообще говоря, количество осаждающейся росы складывается из этих трех источников, хотя только первый создает дополнительное увлажнение земной поверхности, а последний обычно сказывается на остаточных потерях. Другим источником влаги являются туман или облачные капельки, которые собираются на листьях и ветвях и падают на землю в виде капель или стекают непрерывной струей.

Количество росы, осевшей на данной поверхности за определенный период, обычно выражается в $\text{кг} \cdot \text{м}^{-2}$ или в миллиметрах слоя росы. По мере возможности, значения этих величин должны определяться с точностью до одной десятой миллиметра.

Увлажненность листа можно описать как легкую, умеренную или сильную, но ее наиболее важными характеристиками являются время наступления и продолжительность.

Обзор приборов, предназначенных для измерения росы и продолжительности периода увлажнения листа, а также библиография по этому вопросу приведены в публикации WMO (1992b).

Рассмотрим следующие методы измерения увлажнения листа.

Количество росы критическим образом зависит от свойств и параметров поверхности, таких как радиационные свойства, размеры и расположение (горизонтальное или вертикальное). Для измерений используются определенным образом расположенные пластины или поверхность, естественные или искусственные, с известными или стандартизованными качествами, и количество росы оценивается посредством ее взвешивания, визуального наблюдения или использования некоторых ее свойств, например электрической проводимости. Проблема состоит в выборе поверхности, поскольку полученные результаты инструментальных измерений не всегда четко отражают осаждение росы на окружающих предметах. Следовательно, необходимо установить эмпирические соотношения между результатами инструментальных измерений и реальным осаждением росы на естественную поверхность для каждой отдельной совокупности условий, отражающих состояние поверхности и ее подверженность внешним воздействиям, с учетом того, в результате какого процесса образовалась роса, если это важно для конкретного применения.

Был разработан ряд приборов для прямого определения выпадения росы, ее количества, продолжительности периода увлажнения листа и наличия росы. В устройствах, регистрирующих продолжительность периода наличия росы, используются либо элементы, которые сами изменяются под воздействием росы таким образом, что становятся индикаторами влажности или регистраторами продолжительности влажного периода, либо электрические датчики, которые реагируют на изменение электропроводности естественных или искусственных листьев под воздействием влаги, будь то дождь, снег, туман с моросью или роса. В приборах, основанных на принципе взвешивания, количество влаги, осаждающееся в виде осадков или росы, взвешивается или регистрируется. Большинство приборов, обеспечивающих непрерывную

регистрацию в виде кривой, позволяют определить источник выпавшей влаги — туман, росу или дождь. Единственный известный метод измерения суммарного количества росы основан на использовании чувствительного лизиметра (см. настоящий том, глава 10).

В публикации WMO (1992b) два конкретных электронных прибора для измерения увлажнения листа рекомендуются для разработки в качестве эталонных приборов, а также предлагаются различные модели увлажнения листа. Одни модели основаны на принципе энергетического баланса (обратная модель испарения), другие используют корреляцию. Многие из них требуют микрометеорологических измерений. К сожалению, не существует признанного стандартного метода измерения, позволяющего произвести их проверку.

6.6.2 **Измерение отложения льда**

Лед может накапливаться на поверхностях в результате нескольких явлений. Отложение льда в результате замерзания осадков, часто называемое гололедом, является наиболее опасным типом обледенения и может вызвать обширные повреждения деревьев, кустарников, телефонных линий и линий электропередачи. Опасные условия создаются на дорогах и взлетно-посадочных полосах. Изморозь образуется в тех случаях, когда воздух с точкой росы ниже точки замерзания доводится до насыщения путем охлаждения. Изморозь кристаллическая представляет собой отложение сцепленных между собой ледяных кристаллов, образующихся путем прямого осаждения водяного пара, находящегося в воздухе, на предметах обычно небольшого диаметра, таких как ветви деревьев, стебли растений, края листьев, провода, столбы и т. д. Изморозь зернистая представляет собой гранулированные отложения льда белого или молочного цвета, образующиеся при быстром замерзании переохлажденных капель воды при их соприкосновении с открытыми предметами.

6.6.2.1 **Методы измерений**

На метеорологических станциях наблюдение за отложением льда, как правило, носит скорее качественный, чем количественный характер, главным образом ввиду отсутствия соответствующего датчика. Указатели нарастания льда обычно изготавливаются из анодированного алюминия и используются для наблюдения и сообщения о возникновении замерзающих осадков и гололедо-изморозевых отложений.

Наблюдения за отложением льда могут включать в себя как измерения размеров и массы отложения льда, так и описание его внешних свойств. Эти наблюдения особенно важны в горных районах, где величина таких отложений с наветренной стороны гор может превышать нормальное количество осадков. Для наблюдений за отложением льда может быть использовано приспособление, состоящее из стержней и стоек, на которых устанавливаются две пары параллельно расположенных проводов; одна пара располагается в направлении север-юг, другая — в направлении восток-запад. Провода можно подвесить на любом уровне, причем верхний провод каждой пары рекомендуется делать съемным. Во время проведения наблюдений оба верхних провода снимают, помещают в ванночку и вносят в теплое помещение для оттаивания и последующего взвешивания растаявшей пробы. Поперечное сечение отложения измеряется на постоянно закрепленных нижних проводах.

В некоторых странах для постоянной регистрации ледовых отложений используются записывающие устройства. В качестве датчика применяются вертикальный или горизонтальный стержень, кольцо или пластина. Увеличение количества ледовых отложений за какой-то период времени записывается на ленте. Для определения появления и продолжительности существования гололедо-изморозевых отложений применяется простой прибор, называемый ледоскопом. Ледоскоп состоит из круглого фанерного диска диаметром 30 см, который можно поднимать и опускать, устанавливая на любой высоте на вертикальной оси, вкопанной в землю. Обычно диск устанавливается на одном уровне с поверхностью снега для сбора изморози и инея. Изморозь также собирают

на кольцо, закрепленном на стержне. Диаметр кольца составляет 20 см. Кольцо удалено на 20 см от верхнего конца стержня. Проволока или нить диаметром 0,2–0,3 мм, натянутая между кольцом и верхним концом стержня, используется для наблюдения изморозевых отложений. По мере необходимости каждый датчик может быть снят и взвешен.

В стандарте ИСО 12494:2017 (ISO, 2017), который применяется для определения нарастания льда на всех видах конструкций, за исключением проводов воздушной линии электропередач, стандартный прибор для измерения льда описывается следующим образом:

- a) гладкий цилиндр диаметром 30 мм, установленный на вертикальную ось и вращающийся вокруг этой оси. Высота цилиндра должна быть минимум 0,5 м, но если ожидается сильное нарастание льда, высоту цилиндра следует увеличить до 1 м;
- b) цилиндр устанавливается на высоте 10 м над землей;
- c) регистрация величин веса льда может выполняться автоматически.

В работе Fikke et al. (2007) описываются несколько типов детекторов льда, некоторые из которых используются для определения начала и окончания периода нарастания льда, в то время как другие могут также давать количественные характеристики скорости нарастания льда (обычно выражается в $\text{кг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{ч}^{-1}$). Многие датчики основаны на принципе измерения массы льда на вертикальной трубке, используемой в качестве цели для отложения льда. Оптический датчик (ИК луч) определяет изменения в отражающей способности поверхности целевой трубки, когда она покрывается льдом. Другой датчик, широко используемый для определения переохлажденного дождя, включает в себя вибрирующую насадку. Нарастание льда на этой насадке меняет частоту вибрации, что позволяет как определить условия обледенения, так и оценить скорость нарастания льда. Встроенный в насадку нагреватель применяется для плавления льда и поддержания датчика в рабочем состоянии.

6.6.2.2 **Лед на дорожном покрытии**

Разработаны и используются датчики для обнаружения и описания льда на дорогах и взлетно-посадочных полосах; они используются также для обоснования выпуска штормовых предупреждений и технического обслуживания. Более подробная информация по этому вопросу представлена в томе III, глава 10 настоящего Руководства.

Сочетание различных измерений позволяет обнаружить сухой и влажный снег и различные формы льда. Один датчик, в котором используются два электрода, утопленные заподлицо в дорожное покрытие, измеряет электрическую проводимость поверхности и позволяет легко различить сухую и влажную поверхности. Второй датчик измеряет поляризацию ионов, определяемую способностью поверхности удерживать электрический заряд; небольшой заряд пропускается между парой электродов в течение короткого времени, и те же самые электроды измеряют остаточный заряд, величина которого возрастает при наличии на поверхности электролита со свободными ионами, такого как подсолённая вода. Поляризация и проводимость, измеренные одновременно, позволяют различать сухую, влажную и мокрую поверхности, изморозь, снег, белый лед и некоторые химические вещества, используемые против обледенения. Однако в связи с тем, что по поляризуемости некристаллизованный черный лед отличить от воды в некоторых условиях практически невозможно, определить наличие опасного черного льда с помощью этих двух датчиков до сих пор не представляется возможным. Эта проблема решена, по крайней мере, в одной системе путем добавления третьего специализированного измерения электрической емкости, которое позволяет обнаруживать уникальную структуру черного льда.

Вышеуказанный метод является пассивным. Существует и активный метод измерений *in situ* с использованием либо нагревательного элемента, либо нагревательного и охлаждающего элементов для растапливания или замораживания любого льда или жидкости,

присутствующих на поверхности. Одновременные измерения температуры и тепловой энергии, участвующих в цикле таяние — замораживание, используются для определения наличия льда и для оценки точки замерзания смеси на поверхности.

Большинство систем измерения *in situ* включают в себя термометр для измерения температуры поверхности дороги. Качество измерения критическим образом зависит от установки (особенно от материалов) и размещения приборов, и следует принимать меры во избежание ошибок, связанных с солнечной радиацией.

В стадии разработки находятся два метода дистанционного измерения, при использовании которых возможна установка датчиков на автомобиле. Один основан на отражении ИК и микроволнового излучения на некоторых частотах (около 3 000 нм и 3 ГГц соответственно). С помощью микроволнового отражения можно определить толщину слоя воды (и, следовательно, риск потери сцепления с дорогой), но не условия обледенения. Чтобы распознать, в каком состоянии дорога — сухая, влажная или покрыта льдом — могут использоваться две частоты ИК диапазона. Продемонстрирована также зависимость величины отраженного сигнала на длине волны около 2 000 нм от толщины слоя льда.

Во втором методе применяется методика распознавания характеристик по отражению лазерного излучения от дорожного покрытия с целью проведения различия между сухой и влажной поверхностью и черным льдом.

6.6.3 Измерение осадков в виде тумана

Туман состоит из мельчайших капелек воды, взвешенных в атмосфере и формирующих облако у поверхности Земли. Диаметр капель тумана составляет примерно от 1 до 40 мкм и скорость падения от менее чем $1 \text{ см} \cdot \text{с}^{-1}$ до приблизительно $5 \text{ см} \cdot \text{с}^{-1}$. На самом деле скорость падения капель тумана настолько мала, что даже при слабом ветре капли перемещаются почти горизонтально. При наличии тумана горизонтальная видимость составляет менее 1 км, и он редко наблюдается, когда температура и точка росы различаются более чем на 2°C .

Метеорологи, как правило, рассматривают туман как источник ухудшения видимости, а не как форму осадков. Однако, в возвышенных районах, покрытых лесом, часто наблюдается туман в результате адвекции облаков над поверхностью гор. С гидрологической точки зрения в этих случаях рассмотрение осадков без учета тумана может привести к значительной недооценке количества воды, пополняющей водосбор (Stadtmueller and Agudelo, 1990). Позднее признание тумана в качестве источника водоснабжения в районах плоскогорий (Schemenauer and Cereceda, 1994a) и канала влажных выпадений (Schemenauer and Cereceda, 1991; Vong et al., 1991) привело к необходимости стандартизации методов и единиц измерения. Рассмотрим несколько методов измерения осадков в виде тумана.

Несмотря на то, что за прошедшее столетие проводилось большое число измерений сбора тумана деревьями и различными типами коллекторов, сравнить величины такого сбора в количественном отношении трудно. Наиболее широко используемый прибор для измерения тумана представляет собой вертикально расположенный цилиндр из проволочной сетки, центр которого укреплен поверх осадкомера таким образом, что он полностью открыт для свободного потока воздуха. Диаметр цилиндра составляет 10 см, высота — 22 см, а размеры ячеек сетки — $0,2 \times 0,2 \text{ см}$ (Grunow, 1960). Капли из воздуха, насыщенного влагой, осаждаются на сетке и падают вниз, в коллектор осадкомера, где они измеряются или регистрируются таким же образом, как осадки. Некоторые трудности, связанные с этим прибором, заключаются в его малых размерах, отсутствии репрезентативности по отношению к растительному покрову, удержании воды в небольших ячейках сетки и возможности попадания осадков непосредственно в осадкомер, что вносит путаницу в измерение осадков частиц тумана. Кроме того, расчет количества осадков в виде тумана путем простого вычитания количества дождевых

осадков, накопленного в обычном осадкомере (Grunow, 1963), из количества влаги, накопленной в коллекторе тумана, приводит к ошибочным результатам всякий раз, когда наблюдается ветер.

В работе Schemenauer and Cereceda (1994b) предложены недорогой стандартный коллектор тумана площадью 1 м^2 и стандартная единица измерения для количественного определения осаждения частиц тумана, имеющего важное значение в возвышенных районах, покрытых лесом, и для измерения потенциальных объемов сбора в лишенных растительности или пустынных горных районах. Коллектор состоит из плоской панели, изготовленной из ячеек прочного полипропилена, и установлен так, что его основание находится на высоте 2 м над землей. Коллектор соединен с плювиографом с самоопорожняющимся контейнером для определения скорости осаждения. Измерения скорости ветра, проводимые одновременно с измерениями тумана, позволяют получить достоверные оценки соотношения тумана и дождя, выпадающих на вертикальную ячеистую панель. Этот коллектор собирает литры воды. Поскольку площадь его поверхности составляет 1 м^2 , единицей измерения является $1 \text{ л} \cdot \text{м}^{-2}$.

ПРИЛОЖЕНИЕ 6.А. СТАНДАРТНЫЙ ЭТАЛОННЫЙ ОСАДКОМЕР ЯМОЧНОГО ТИПА

Эталонный осадкомер устанавливается в яму с хорошей дренажной системой в соответствии с конструкцией и спецификацией, описанной в стандарте EN-13798:2010 (CEN, 2010) для сведения к минимуму влияния окружающей среды на измеренную интенсивность дождевых осадков и защиты от забрызгивания с помощью металлической или пластиковой решетки. Ожидается, что прикопанный или утопленный осадкомер (см. Koschmider, 1934, Sieck et al., 2007) показывает более высокие значения дождевых осадков, чем прибор, установленный над землей, с возможной разницей в 10 % или более, когда оба прибора работают идеально и точно. Решетки предпочтительно устанавливать на уровне земли для того, чтобы избежать поверхностного стока воды (см. общую конфигурацию на рисунке 6.А.1). Яма должна быть достаточной глубины, чтобы вместить в себя осадкомер и выровнять коллектор осадкомера на одном уровне с решеткой (уровень земли) и разместить прибор по центру ямы. Форма ямы должна учитывать размеры осадкомера и метод установки прибора. В основании ямы делается углубление (дополнительная яма) для сбора дренажной воды и ее отвода из ямы. Квадратная ячейка решетки также подбирается в соответствии с диаметром коллектора осадкомера для того, чтобы удовлетворять стандартным требованиям, изложенным в стандарте CEN (2010). Стенки ямы укрепляются кирпичами с раствором для укрепления и предотвращения обрушения стенок. Поддерживающие стенки располагаются по краям решетки размером приблизительно 1 875 x 1 875 x 120 мм (Д x Ш x В), которая устанавливается на стенки ямы с возможностью снятия решетки для доступа к осадкомеру с целью проверки работы и обслуживания прибора. Сторона ячейки решетки составляет приблизительно 120–125 мм. Решетка должна быть достаточно прочной, чтобы по ней можно было ходить и она при этом сохраняла свою форму без деформаций. Для предотвращения разбрызгивания капель дождя на поверхности решетки толщина полос, которые образуют решетку, составляет 2 мм, а расстояние между краем центрального квадрата и землей должна быть более 600 мм (более подробная информация приводится в CEN (2010)). На рисунке 6.А.2 представлен пример установки четырех стандартных эталонных осадкомеров ямочного типа, описанных в публикации WMO (2009).

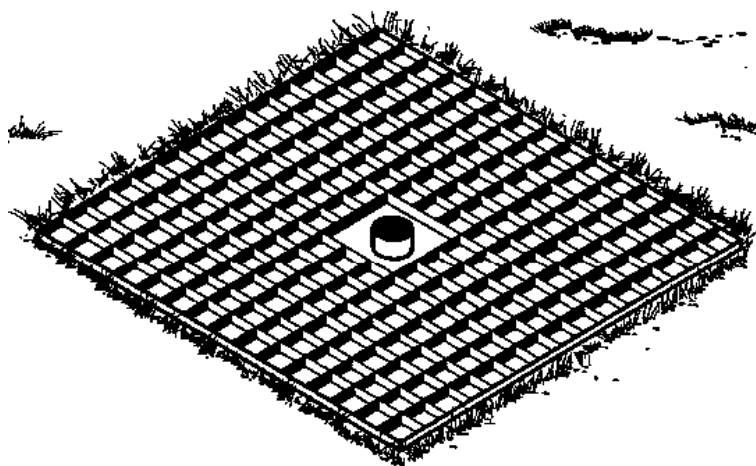


Рисунок 6.А.1. Осадкомер ямочного типа и его решетка
(вариант установки на уровне земли)

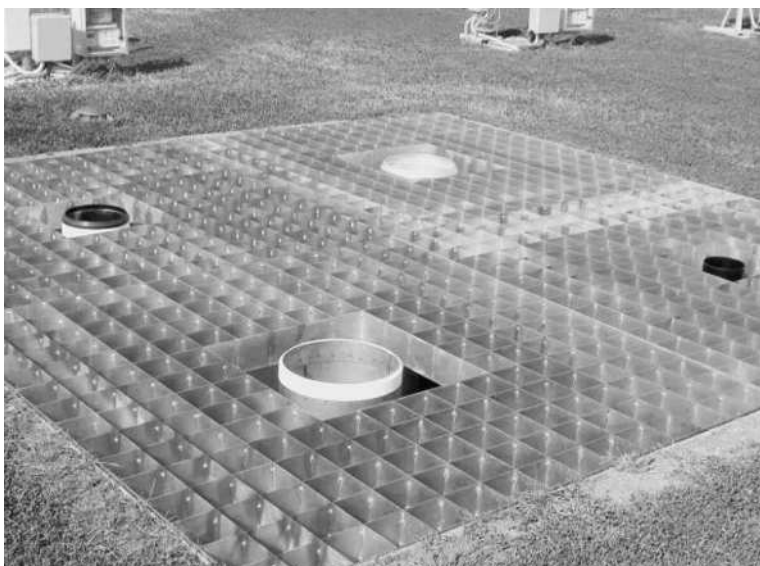


Рисунок 6.А.2. Установка эталонных осадкомеров ямочного типа на станции Винья-ди-Валле, Италия (2007 г.) во время проведения ВМО полевых взаимных сравнений измерений интенсивности осадков

ПРИЛОЖЕНИЕ 6.В. СТАНЦИИ ПРОВЕДЕНИЯ ВЗАИМНЫХ СРАВНЕНИЙ ИЗМЕРЕНИЙ ОСАДКОВ

Нижеследующий текст о станциях для взаимных сравнений измерения осадков подготовлен с учетом заявлений, сделанных КПМН на ее одиннадцатой сессии, состоявшейся в 1994 г., и он был обновлен с учетом решений ее пятнадцатой сессии в 2010 г.:

Комиссия подтвердила преимущества существования национальных станций или центров, в которых могут быть оценены на современной основе прошлые, современные и будущие приборы и методы наблюдения за осадками. Эти станции должны:

- a) эксплуатировать рекомендованные ВМО конфигурации измерительных устройств для жидких осадков (эталонный наземный осадкомер ямочного типа) и для снега DFIR. Установка и эксплуатация будут производиться в соответствии со спецификациями, полученными по результатам взаимных сравнений измерений осадков, проводимых по линии ВМО. Установка DFIR не требуется, когда ведутся наблюдения только за жидкими осадками;
 - b) эксплуатировать оперативные осадкомеры, использовавшиеся в прошлом, существующих и новых типов или применять другие методы наблюдений в соответствии со стандартными оперативными процедурами (СОП) и оценивать точность и технические характеристики в сравнении с рекомендованными эталонными приборами ВМО;
 - c) проводить вспомогательные метеорологические измерения, которые дают возможность разработки и проверки применения процедур коррекции осадков;
 - d) обеспечивать контроль качества (КК) данных, помещать в архив в простом приемлемом формате, предпочтительно цифровом, все данные взаимных сравнений измерений осадков, включая связанные с ними данные метеорологических наблюдений и метаданные;
 - e) функционировать непрерывно как минимум 10 лет;
 - f) производить проверку всех имеющихся процедур коррекции осадков (в особенности тех, которые описаны в окончательных отчетах о взаимных сравнениях, проводимых по линии ВМО) для измерений жидких и твердых осадков;
 - g) содействовать проведению научных исследований в области измерения осадков. Не ожидается, что центры будут осуществлять калибровку или проверку приборов. Они должны готовить рекомендации о национальных стандартах наблюдений и оценивать влияние изменений методов наблюдений на однородность временных рядов данных по осадкам в регионе. На месте проведения наблюдений должно быть обеспечено наличие эталонного стандарта для калибровки и валидации наблюдений осадков, проводимых с помощью радиолокаторов или дистанционного зондирования.
-

ПРИЛОЖЕНИЕ 6.С. СТАНДАРТИЗИРОВАННАЯ ПРОЦЕДУРА ДЛЯ ЛАБОРАТОРНОЙ КАЛИБРОВКИ ПРИБОРОВ НАКОПИТЕЛЬНОГО ТИПА, ИЗМЕРЯЮЩИХ ИНТЕНСИВНОСТЬ ДОЖДЯ

1. Принципы

Лаборатория калибровки должна быть хорошо подготовлена для проведения калибровки приборов, которые используются для оперативной работы. Помимо наличия правильно разработанной эталонной системы, перед началом каждой калибровки все процедуры калибровки должны быть документально оформлены со всеми подробностями и хорошо отработаны, а персонал должен быть хорошо подготовлен перед началом поверочных работ (см. подробную информацию в стандарте ИСО/МЭК 17025 (ISO/IEC, 2017)). Результаты каждой калибровки должны быть оформлены свидетельством о проведении калибровки с описанием результатов (включая описание применявшихся поправок), что позволяет провести проверку на соответствие рекомендациям ВМО.

В свидетельстве также должна быть указана неопределенность измерения для интенсивности дождя. В свидетельстве должны быть документально оформлены результаты сопоставления с эталонной системой измерения интенсивности дождя, условия окружающей среды (такие как температура) и указан применявшийся метод осреднения по времени.

Калибровку приборов для измерения интенсивности дождя следует производить, используя систему калибровки, которая:

- a) может создавать постоянную интенсивность поступления воды при разных уровнях интенсивности, охватывающих весь рабочий диапазон измерения интенсивности дождя (рекомендованный диапазон: от $0,2 \text{ мм} \cdot \text{ч}^{-1}$ до $2\,000 \text{ мм} \cdot \text{ч}^{-1}$);
- b) может измерять поток воды посредством взвешивания количества воды, поступившей за определенный период времени;
- c) может производить измерение выходного сигнала откалиброванного прибора через регулярные промежутки времени или при возникновении сигнального импульса, что характерно для большинства осадкомеров с самоопорожняющимся контейнером.

2. Требования

- a) Система калибровки должна обеспечивать получение неопределенностей менее 1 % для генерируемой интенсивности дождя, и такую работу системы следует подробно детализировать и описать;
- b) при использовании осадкомеров с самоопорожняющимся контейнером следует проконтролировать точность и соответствие требованиям к балансировке челнока, чтобы обеспечить минимальные расхождения в длительности опрокидывания во время процесса измерения;
- c) следует использовать, по крайней мере, пять контрольных уровней интенсивности с надлежащими интервалами между ними, чтобы охватить весь рабочий диапазон прибора;
- d) количество контрольных точек для измерения интенсивности дождя должно быть достаточно большим, чтобы посредством интерполяции по точкам можно было построить кривую. Следует выбрать контрольные точки и расположить их на достаточном расстоянии друг от друга, позволяющем посредством интерполяции построить калибровочную кривую таким образом, чтобы неопределенность кривой, построенной по точкам, была ниже неопределенности, предусмотренной для всего диапазона измерений;

- e) расчет интенсивности поступления воды основывается на измерении массы поступившей воды и времени;
- f) измерение массы должно быть с точностью выше чем 0,1 %;
- g) каждое испытание должно быть достаточно продолжительным, чтобы гарантировать при созданной интенсивности неопределенность менее 1 %;
- h) максимальное временное разрешение для измерения интенсивности дождя должно составлять 1 с;
- i) при осуществлении связанной с калибровкой лабораторной деятельности, рассматривая возможные источники ошибок, следует учесть следующее:
 - i) качество/степень чистоты воды, используемой для калибровки, должно быть строго определенным;
 - ii) воспроизводимость условий калибровки следует выделить в качестве приоритета;
 - iii) следует использовать надлежащее оборудование для контроля и записывания (управляемое с помощью персонального компьютера);
 - iv) все приемные системы должны удовлетворять требованиям электромагнитной совместимости во избежание паразитических импульсов;
- j) обычно при измерении количества осадков говорится о высоте слоя осадков, выраженной в миллиметрах, хотя весовые осадкомеры измеряют массу. Так как интенсивность дождя зависит от температуры окружающей среды, связь между массой и эквивалентной высотой слоя дождя вносит неточность, которую следует принимать во внимание при калибровке и расчете неопределенности;
- k) условия окружающей среды во время каждой калибровки должны быть отмечены и зарегистрированы:
 - i) дата и время (начало/завершение);
 - ii) температура воздуха (°C);
 - iii) температура воды (°C);
 - iv) атмосферное давление (гПа);
 - v) относительная влажность окружающей среды (%);
 - vi) какие-либо особые условия, касающиеся калибровки (например, вибрация);
 - vii) необходимо оценить потери, связанные с испарением (мм);
- l) количество испытаний, проведенных для каждого прибора, их описание в единицах времени и/или количество опрокидываний должны быть документально оформлены.

3. Процедура интерпретации данных

- a) Результаты должны быть представлены в форме графика, где относительная погрешность наносится против значения контрольного уровня интенсивности. Для каждой контрольной скорости потока относительная погрешность оценивается как:

$$e = \frac{I_m - I_r}{I_r} \cdot 100 \%$$

где I_m — интенсивность, измеренная прибором, и I_r — фактический контрольный уровень интенсивности, обеспечиваемый прибором;

- b) для каждого ряда контрольных уровней интенсивности следует провести по возможности пять испытаний, но минимально три, так чтобы для каждого прибора было получено пять значений погрешности. Среднее значение погрешности и средние значения I_r и I_m рассчитываются посредством отбрасывания минимального и максимального значений e , полученных для каждого контрольного уровня интенсивности поступления воды, и последующего определения среднего арифметического трех оставшихся значений погрешности и значений контрольных уровней интенсивности. Для каждого уровня интенсивности следует представить диаграмму погрешностей, включающую все пять значений погрешности, использованные для определения средних значений;
- c) кроме того, можно построить график зависимости между I_r и I_m , где I_r и I_m — средние значения, рассчитанные как указано выше; все данные согласовываются с кривой интерполяции, полученной в качестве наилучшего приближения (допустимо использование линейного приближения, экспоненциального закона или полинома второго порядка);
- d) на графиках, представляющих результаты, должны быть нанесены ограничения $\pm 5 \%$, которые позволяют легко сравнить результаты с рекомендациями ВМО;
- e) если происходит накопление воды при интенсивности ниже максимального заявленного уровня интенсивности, то следует отметить уровень интенсивности, с которого началось накопление воды, в свидетельстве о проведении калибровки и рассмотреть уровни интенсивности, превышающие этот уровень;
- f) в дополнение к измерениям, основанным на постоянной скорости потока воды, для каждого прибора, не являющегося осадкомером с самоопорожняющимся контейнером, следует измерить отклик на ступенчатое воздействие. Отклик на ступенчатое воздействие следует измерять посредством перехода от одного уровня постоянной интенсивности потока к другому и обратно, а именно от $0 \text{ мм} \cdot \text{ч}^{-1}$ к контрольному уровню и обратно к $0 \text{ мм} \cdot \text{ч}^{-1}$. Уровень постоянной интенсивности потока следует использовать до тех пор, пока выходной сигнал прибора не стабилизируется, т. е. когда дальнейшие изменения или колебания в созданном уровне интенсивности дождя можно не учитывать по отношению к установленной неопределенности измерений с помощью эталонной системы. Частота замеров должна быть не менее одного в минуту для приборов, которые позволяют такую частоту. Время до стабилизации принимается в качестве времени задержки прибора в измерении контрольного уровня интенсивности. Для обеспечения точных измерений интенсивности дождя время задержки должно составлять менее одной минуты. Время отклика всегда должно быть документально зафиксировано в свидетельстве о проведении калибровки.

4. Расчет неопределенности

Следует учесть и представить в количественной форме следующие источники неопределенности в измерениях:

- a) механизм формирования потока воды: неопределенность в равномерности поступления воды, вызванная возможными изменениями в механизме формирования постоянной интенсивности потока воды, включая разницу в давлении внутри емкости для воды и в распределительных трубках;
- b) приборы для измерения потока воды (как эталонный, так и тот, калибровка которого производится): неопределенность, связанная с весовым прибором, временем измерения, задержками в получении и обработке данных и изменениями в экспериментальных и внешних условиях, таких как температура и относительная влажность.

Два этих источника неопределенности не зависят друг от друга, следовательно, можно провести их независимый анализ, а затем объединить результаты.

ПРИЛОЖЕНИЕ 6.D. ПРЕДЛОЖЕННЫЕ ПРОЦЕДУРЫ КОРРЕКЦИИ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЙ ОСАДКОВ

Нижеследующий текст относительно процедур коррекции, применяемых при измерении осадков, подготовлен с учетом заявлений, сделанных КПМН на ее одиннадцатой сессии, состоявшейся в 1994 г.

Методы коррекции основаны на упрощенных физических концепциях, представленных в публикации ВМО (1987 г.). Они зависят от типа применяемого датчика измерения осадков. Влияние ветра на осадкомер конкретного типа было оценено с использованием сравнительных измерений, проведенных с помощью эталонных осадкомеров ВМО – наземного осадкомера для дождя и DFIR для снега, описанных в публикации ВМО (1984), и по результатам взаимных сравнений измерений твердых осадков, проводившихся по линии ВМО (ВМО, 1998). Приведение скорости ветра к уровню приемного отверстия осадкомера следует осуществлять по следующей формуле:

$$u_{hp} = (\log h z_0^{-1}) \cdot (\log H z_0^{-1})^{-1} \cdot (1 - 0,024\alpha) u_H$$

где u_{hp} — скорость ветра на уровне приемного отверстия осадкомера; h — высота приемного устройства осадкомера над поверхностью земли; z_0 — параметр шероховатости (0,01 м для зимы и 0,03 м для лета); H — высота установки прибора для измерения скорости ветра над поверхностью земли; u_H — скорость ветра, измеренная на высоте H над поверхностью земли; α — средняя угловая высота препятствий вокруг осадкомера.

Последний параметр зависит от степени защищенности места расположения осадкомера и может быть получен либо по среднему значению прямых измерений угловой высоты препятствий (в градусах круга) в одном из восьми направлений розы ветров вокруг осадкомера, либо на основе классификации степени защищенности с использованием метаданных, которые хранятся в архивах НМГС. Имеются следующие классы:

Класс	Угол	Описание
Открытое место наблюдений	0–5	Несколько малых препятствий, таких как кусты, группы деревьев, отдельный дом
Полузащищенное место наблюдений	6–12	Небольшие группы деревьев или кустов, либо один-два дома
В основном защищенное место наблюдений	13–19	Парки, лесные опушки, центры деревень, фермы, группы домов, дворы
Защищенное место наблюдений	20–26	Молодой лес, небольшая лесная поляна, парк с большими деревьями, центры городов, глубокие закрытые долины, сильно пересеченная местность, подветренные склоны больших холмов

Потери на смачивание происходят при увлажнении внутренних стенок осадкомера. Они зависят от формы и материала осадкомера, а также от типа и частоты выпадения осадков. Например, для осадкомера Хеллмана они составляют в среднем 0,3 мм в сутки при дожде или 0,15 мм в сутки при выпадении снега; соответствующие значения для осадкомера Третьякова составляют 0,2 и 0,1 мм. Информацию по поводу потерь на смачивание для других типов осадкомеров можно найти в публикации ВМО (1982).

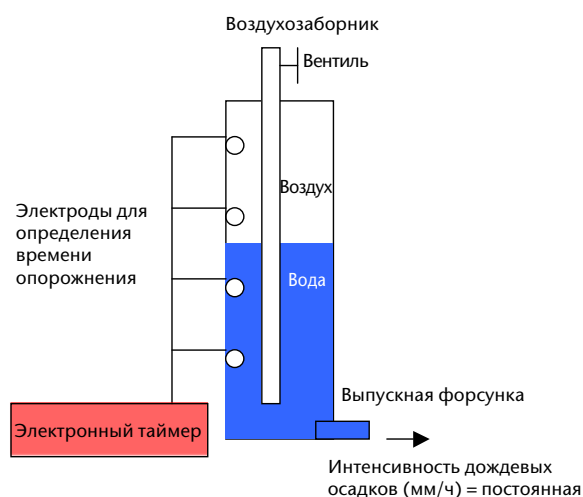
ПРИЛОЖЕНИЕ 6.Е. ПРОЦЕДУРА ДЛЯ КАЛИБРОВКИ В ПОЛЕВЫХ УСЛОВИЯХ ПРИБОРОВ НАКОПИТЕЛЬНОГО ТИПА, ИЗМЕРЯЮЩИХ ИНТЕНСИВНОСТЬ ДОЖДЯ

Калибровка в полевых условиях является частью обычного обслуживания и проверки в полевых условиях, и она должна выполняться на регулярной основе. Ее главной целью является проверка рабочего состояния осадкомера: определить неисправности, отклонения в выходных данных, смещение характеристик прибора со временем или между лабораторными калибровками. Калибровка в полевых условиях предоставляет также полезные важные сведения для анализа данных и их интерпретации. Процедура основывается на тех же принципах, что и для лабораторной калибровки (приводится в приложении 6.С), с использованием генерирования постоянной интенсивности (неизменный эталонный поток) в пределах рабочего диапазона прибора.

Установка для калибровки в полевых условиях обычно состоит из цилиндрического резервуара достаточной емкости с водой; комбинации из воздухозаборника и выпускной форсунки для различной интенсивности дождевых осадков и электронной системы для расчета времени опорожнения (см. рисунок ниже). Подходящая комбинация воздухозаборника и выпускной форсунки должна подбираться на основе учета размера коллектора осадкомера и значения интенсивности, выбранного для калибровки. Путем открывания верхнего вентиля и форсунки на дне резервуара подается постоянный поток воды в сифон осадкомера, и, зная время опорожнения, с помощью таблицы соотношений (объем-время-интенсивность) можно высчитать эталонную интенсивность. Воздухозаборник обеспечивает компенсацию давления и таким образом поддерживается постоянный напор воды.

С точки зрения оперативной работы портативная полевая установка для калибровки позволяет быстро провести проверку благодаря очень простому принципу работы установки. Установка для калибровки не содержит каких-либо сложных компонентов и поэтому предоставляет самое экономичное решение для метрологической верификации интенсивности потока, измеряемого осадкомером.

Воспроизводимость результатов работы полевой установки для калибровки (и ее точность) следует неукоснительно подвергать проверке в лабораторных условиях перед тем, как использовать ее в работе. Неопределенность предпочтительно следует выражать как относительную расширенную неопределенность по отношению к статистическому интервалу охвата (95 % уровень доверительной вероятности, $k = 2$), и она должна быть менее 2 %.



Упрощенная схема работы портативной полевой установки для калибровки.

Статистический анализ относительных погрешностей применительно к полевому эталонному потоку установки для калибровки следует проводить для каждого осадкомера, откалиброванного в полевых условиях. Следует зарегистрировать минимум 25–30 измерительных точек (обычно 1 мин значение интенсивности в $\text{мм} \cdot \text{ч}^{-1}$) для каждой эталонной интенсивности (выбранной полевым калибровочным инструментом). Это дает возможность допустить нормальное распределение данных вокруг осредненного значения, лучше оценить среднюю величину и повысить точность результатов (центральная предельная теорема). Все поверки должны выполняться в условиях окружающей среды без осадков или тумана и при слабом ветре (чтобы избежать возмущения потока в результате динамического напора на воздушную впускную форсунку). Эталонная интенсивность всегда должна быть в начале минуты, синхронизированной с часами прибора или регистратора времени (время-штемпель должностного лица/станции).

Минимальный набор статистических параметров и метаданных, регистрируемых после каждой калибровки в полевых условиях, приводится ниже:

- a) дата и время;
- b) эталонная интенсивность в $\text{мм} \cdot \text{ч}^{-1}$ (I_{ref}): постоянная интенсивность, генерируемая полевой установкой для калибровки;
- c) средние ($\text{avg}I$) значения интенсивности (I_{lmin}) в $\text{мм} \cdot \text{ч}^{-1}$ осадкомера во время проведения калибровки, рассчитанные по следующей формуле:

$$\text{avg}I = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N (I_{\text{lmin}}^j) \quad (6.E.1)$$

- d) экстремальные значения (а именно $I_{+CL95\%}$, $I_{-CL95\%}$) интервала $[\text{avg}I - \delta (95\%), \text{avg}I + \delta (95\%)] = [I_{+CL95\%}; I_{-CL95\%}]$, соответствующие 95 % уровню доверительной вероятности. Амплитуда $\delta (95\%)$ равна половине центрального доверительного интервала, рассчитанного в соответствии с нормальным распределением вероятности или распределением вероятности Стьюдента t на основе выборки (она включает в себя расчет среднеквадратического отклонения);
- e) относительная погрешность в процентах средней интенсивности, рассчитанная как указано ниже:

$$RE_{\text{avg}I} = 100 \cdot \left(\frac{\text{avg}I - I_{\text{ref}}}{I_{\text{ref}}} \right) \quad (6.E.2)$$

- f) относительные погрешности в процентах $I_{+CL95\%}$ и $I_{-CL95\%}$, рассчитанные по формуле:

$$RE_{+CL95\%} = 100 \cdot \left(\frac{I_{+CL95\%} - I_{\text{ref}}}{I_{\text{ref}}} \right) \quad (6.E.3)$$

$$RE_{-CL95\%} = 100 \cdot \left(\frac{I_{-CL95\%} - I_{\text{ref}}}{I_{\text{ref}}} \right) \quad (6.E.4)$$

Последние три статистических параметра используются для расчета относительных погрешностей осадкомера в отношении интенсивности с интервалом неопределенности 95 % уровня доверительной вероятности для каждой эталонной интенсивности, используемой в течение калибровки. Регулярная повторяемость калибровки в полевых условиях и сравнение результатов позволяют оценить стабильность результатов калибровки и возможные аномалии.

СПРАВОЧНАЯ И ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА

- Всемирная метеорологическая организация, 2008: *Руководство по гидрологической практике* (БМО-№ 168), том I. Женева.
- Chan, Y.W., C.L. Yu and K.H. Tam, 2015: Inter-comparison of raingauges on rainfall amount and intensity measurements in a tropical environment. *Journal of Geodesy and Geomatics Engineering*, 1:12–25.
- Colli, M., L.G. Lanza and P.W. Chan, 2013a: Co-located tipping-bucket and optical drop counter RI measurements and a simulated correction algorithm. *Atmospheric Research*, 119:3–12.
- Colli, M., L.G. Lanza and P. La Barbera, 2013b: Performance of a weighing rain gauge under laboratory simulated time-varying reference rainfall rates. *Atmospheric Research*, 131:3–12.
- European Committee for Standardization (CEN), 2010: *Hydrometry – Specification for a Reference Raingauge Pit*, EN 13798:2010.
- Fikke, S., G. Ronsten, A. Heimo, S. Kunz, M. Ostrozlik, P.E. Persson, J. Sabata, B. Wareing, B. Wichura, J. Chum, T. Laakso, K. Säntti and L. Makkonen, 2007: *COST-727: Atmospheric Icing on Structures; Measurements and data collection on icing: State of the Art*, MeteoSwiss, No. 75.
- Goodison, B.E., J.R. Metcalfe, R.A. Wilson and K. Jones, 1988: The Canadian automatic snow depth sensor: A performance update. *Proceedings of the Fifty-sixth Annual Western Snow Conference*, Atmospheric Environment Service, Canada, pp. 178–181.
- Goodison, B.E., B. Sevruk and S. Klemm, 1989: WMO solid precipitation measurement intercomparison: Objectives, methodology and analysis. In: International Association of Hydrological Sciences, 1989: *Atmospheric deposition. Proceedings*, Baltimore Symposium (May, 1989), IAHS Publication No. 179, Wallingford.
- Grunow, J., 1960: The productiveness of fog precipitation in relation to the cloud droplet spectrum. In: American Geophysical Union, 1960, *Physics of precipitation*. Geophysical Monograph No. 5, *Proceedings of the Cloud Physics Conference* (3–5 June 1959, Woods Hole, Massachusetts), Publication No. 746, pp. 110–117.
- , 1963: *Weltweite Messungen des Nebelniederschlags nach der Hohenpeissenberger Methode*. In: International Union of Geodesy and Geophysics, General Assembly (Berkeley, California, 19–31 August 1963), International Association of Scientific Hydrology Publication No. 65, pp. 324–342.
- Habib, E., W.F. Krajewski and A. Kruger, 2001: Sampling errors of tipping-bucket rain gauge measurements. *Journal of Hydrologic Engineering*, 6:159–166.
- International Organization for Standardization, 2017: *Atmospheric Icing of Structures*, ISO 12494:2017. Geneva.
- International Organization for Standardization/International Electrotechnical Commission, 2017: *General Requirements for the Competence of Testing and Calibration Laboratories*, ISO/IEC 17025:2017. Geneva.
- Koschmieder, H., 1934: Methods and results of definite rain measurements; III. Danzig Report (1). *Monthly Weather Review*, 62:5–7.
- Legates, D.R. and C.J. Willmott, 1990: Mean seasonal and spatial variability in gauge-corrected, global precipitation. *Int. J. Climatology*, 10:111–127.
- Nespor, V. and B. Sevruk, 1999: Estimation of wind-induced error of rainfall gauge measurements using a numerical simulation. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 16(4):450–464.
- Niemczynowicz, J., 1986: The dynamic calibration of tipping-bucket raingauges. *Nordic Hydrology*, 17:203–214.
- Rinehart, R.E., 1983: Out-of-level instruments: Errors in hydrometeor spectra and precipitation measurements. *Journal of Climate and Applied Meteorology*, 22:1404–1410.
- Schemenauer, R.S. and P. Cereceda, 1991: Fog water collection in arid coastal locations. *Ambio*, 20(7):303–308.
- , 1994a: Fog collection's role in water planning for developing countries. *Natural Resources Forum*, 18(2):91–100.
- , 1994b: A proposed standard fog collector for use in high-elevation regions. *Journal of Applied Meteorology*, 33(11):1313–1322.
- Sevruk, B., 1974a: Correction for the wetting loss of a Hellman precipitation gauge. *Hydrological Sciences Bulletin*, 19(4):549–559.
- , 1974b: Evaporation losses from containers of Hellman precipitation gauges. *Hydrological Sciences Bulletin*, 19(2):231–236.

- , 1984: Comments on “Out-of-level instruments: Errors in hydrometeor spectra and precipitation measurements”. *Journal of Climate and Applied Meteorology*, 23:988–989.
- Sevruk, B. and V. Nespor, 1994: The effect of dimensions and shape of precipitation gauges on the wind-induced error. In: *Global Precipitation and Climate Change* (M. Desbois and F. Desalmand, eds.). NATO ASI Series, Springer Verlag, Berlin, 126:231–246.
- Sevruk, B. and L. Zahlavova, 1994: Classification system of precipitation gauge site exposure: Evaluation and application. *International Journal of Climatology*, 14(6):681–689.
- Sieck, L.C., S.J. Burges and M. Steiner, 2007: Challenges in obtaining reliable measurements of point rainfall. *Water Resources Research*, 43:1–23.
- Slovak Hydrometeorological Institute and Swiss Federal Institute of Technology, 1993: Precipitation measurement and quality control. *Proceedings of the International Symposium on Precipitation and Evaporation* (B. Sevruk and M. Lapin, eds.) (Bratislava, 20–24 September 1993), Volume I, Bratislava and Zurich.
- Smith, J.L., H.G. Halverson and R.A. Jones, 1972: *Central Sierra Profiling Snowgauge: A Guide to Fabrication and Operation*. USAEC Report TID-25986, National Technical Information Service, U.S. Department of Commerce, Washington DC.
- Stadtmuller, T. and N. Agudelo, 1990: Amount and variability of cloud moisture input in a tropical cloud forest. In: *Proceedings of the Lausanne Symposia* (August/November), IAHS Publication No. 193, Wallingford.
- Stagnaro, M., M. Colli, L.G. Lanza and P.W. Chan, 2016: Performance of post-processing algorithms for rainfall intensity using measurements from tipping-bucket rain gauges. *Atmospheric Measurement Techniques*, 9(12):5699–5706.
- Vong, R.J., J.T. Sigmon and S.F. Mueller, 1991: Cloud water deposition to Appalachian forests. *Environmental Science and Technology*, 25(6):1014–1021.
- World Meteorological Organization, 1972: Evaporation losses from storage gauges (B. Sevruk). In: *Distribution of Precipitation in Mountainous Areas*, Geilo Symposium (Norway, 31 July–5 August 1972), Volume II – technical papers (WMO-No. 326). Geneva.
- , 1982: *Methods of Correction for Systematic Error in Point Precipitation Measurement for Operational Use* (B. Sevruk). Operational Hydrology Report No. 21 (WMO-No. 589). Geneva.
- , 1984: *International Comparison of National Precipitation Gauges with a Reference Pit Gauge* (B. Sevruk and W.R. Hamon). Instruments and Observing Methods Report No. 17 (WMO/TD-No. 38). Geneva.
- , 1985: *International Organizing Committee for the WMO Solid Precipitation Measurement Intercomparison*. Final report of the first session (distributed to participants only). Geneva.
- , 1986: *Papers Presented at the Workshop on the Correction of Precipitation Measurements* (B. Sevruk, ed.) (Zurich, Switzerland, 1–3 April 1985). Instruments and Observing Methods Report No. 25 (WMO/TD-No. 104). Geneva.
- , 1987: *Instruments Development Inquiry* (E. Prokhorov). Instruments and Observing Methods Report No. 24 (WMO/TD-No. 231). Geneva.
- , 1989a: *Catalogue of National Standard Precipitation Gauges* (B. Sevruk and S. Klemm). Instruments and Observing Methods Report No. 39 (WMO/TD-No. 313). Geneva.
- , 1989b: *International Workshop on Precipitation Measurements* (B. Sevruk, ed.) (St Moritz, Switzerland, 3–7 December 1989). Instruments and Observing Methods Report No. 48 (WMO/TD-No. 328). Geneva.
- , 1992a: *Snow Cover Measurements and Areal Assessment of Precipitation and Soil Moisture* (B. Sevruk, ed.). Operational Hydrology Report No. 35 (WMO-No. 749). Geneva.
- , 1992b: *Report on the Measurement of Leaf Wetness* (R.R. Getz). Agricultural Meteorology Report No. 38 (WMO/TD-No. 478). Geneva.
- , 1998: *WMO Solid Precipitation Measurement Intercomparison: Final Report* (B.E. Goodison, P.Y.T. Louie and D. Yang). Instruments and Observing Methods Report No. 67 (WMO/TD-No. 872). Geneva.
- , 2006: *WMO Laboratory Intercomparison of Rainfall Intensity Gauges* (L.G. Lanza, M. Leroy, C. Alexandropoulos, L. Stagi and W. Wauben). Instruments and Observing Methods Report No. 84 (WMO/TD-No. 1304). Geneva.
- , 2009: *WMO Field Intercomparison of Rainfall Intensity Gauges* (E. Vuerich, C. Monesi, L.G. Lanza, L. Stagi, E. Lanzinger). Instruments and Observing Methods Report No. 99 (WMO/TD-No. 1504). Geneva.

- Yang, D., J.R. Metcalfe, B.E. Goodison and E. Mekis, 1993: True Snowfall: An evaluation of the Double Fence Intercomparison Reference Gauge. *Proceedings of the Fiftieth Eastern Snow Conference*, Quebec City, 8–10 June 1993, Quebec, Canada, pp. 105–111.
- Yang, D., B.E. Goodison, J.R. Metcalfe, V.S. Golubev, E. Elomaa, T. Gunther, R. Bates, T. Pangburn, C.L. Hanson, D. Emerson, V. Copaciu and J. Milkovic, 1995: Accuracy of Tretyakov precipitation gauge: results of WMO intercomparison. *Hydrological Processes*, 9:877–895.
-