

## ГЛАВА 10. ИЗМЕРЕНИЕ ИСПАРЕНИЯ

### 10.1 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

#### 10.1.1 Определения

*Международный гидрологический словарь* (ВМО/Организация Объединённых Наций по вопросам образования, науки и культуры, 2012) и *Международный метеорологический словарь* (ВМО, 1992) дают следующие определения (с некоторыми отличиями):

**(Действительное) испарение.** Количество воды, испаряющейся с открытой поверхности воды и/или почвы.

**Транспирация.** Процесс, при котором вода с растений переносится в атмосферу в виде пара.

**(Действительное) суммарное испарение (или эффективное суммарное испарение).** Количество водяного пара, испаряющегося с поверхности почвы и растений при естественном уровне влагосодержания почвы.

**Потенциально возможное испарение (или испаряемость).** Количество водяного пара, которое могло бы испариться с поверхности чистой воды с единицы площади и за единицу времени при существующих метеорологических условиях.

**Потенциальное суммарное испарение.** Максимальное количество воды, которая может испариться в данных климатических условиях с участка сплошной растительности, полностью покрывающей почву и хорошо снабжаемой водой. Потенциальное суммарное испарение включает испарение с поверхности почвы и транспирацию растений в конкретном районе в определенный период времени. Потенциальное суммарное испарение выражается как толщина слоя воды.

Если используется термин *потенциальное суммарное испарение*, то должны ясно указываться типы испарения и транспирации. За более подробной информацией по этим терминам следует обращаться к публикации ВМО (2008), том I.

#### 10.1.2 Единицы измерения

Скорость испарения определяется как количество воды, испарившейся с единицы площади за единицу времени. Она может быть выражена как масса или объем жидкой воды, испарившейся с площади за единицу времени; обычно она выражается как эквивалентная толщина слоя жидкой воды, испарившейся за единицу времени с поверхности любой площади. За единицу времени обычно приняты сутки. Объем испарившейся воды следует выражать в миллиметрах (ВМО, 2015). В зависимости от типа прибора обычная погрешность измерения составляет от 0,1 до 0,01 мм.

#### 10.1.3 Метеорологические требования

Оценки как испарения со свободных поверхностей воды и с почвы, так и суммарного испарения с поверхностей, покрытых растительностью, имеют большое значение для гидрологического моделирования, а также для гидрометеорологических и сельскохозяйственных исследований, например, при проектировании и эксплуатации водохранилищ, ирригационных и дренажных систем.

Требования к проведению работ описаны в настоящем томе, глава 1. Для суточных сумм максимальный диапазон составляет 0–100 мм при разрешении 0,1 мм. Неопределенность

при 95 % степени достоверности должна составлять  $\pm 0,1$  мм для объемов менее 5 мм и  $\pm 2$  % для больших объемов. Точность в 1 мм предложена в качестве достижимой. В принципе, обычные приборы могут удовлетворять таким требованиям к точности, однако сложности при размещении и эксплуатации приводят к появлению значительно больших погрешностей измерений (WMO, 1976).

Факторы, влияющие на скорость испарения с любого предмета или поверхности, можно в целом разделить на две группы: метеорологические факторы и факторы, связанные с характеристиками поверхности, причем каждый из них может ограничивать скорость испарения. В свою очередь, метеорологические факторы делятся на энергетические и аэродинамические переменные. Энергия необходима для превращения воды из жидкости в пар; в природе это происходит главным образом за счет солнечной радиации и земного излучения. Аэродинамические переменные, такие как скорость ветра у поверхности земли и разность значений давления пара на участке между поверхностью и нижними слоями атмосферы, влияют на скорость переноса водяного пара.

Полезно различать случаи наличия или отсутствия несвязанной воды на поверхности. К важным факторам относятся количество и состояние воды, а также такие характеристики поверхности, которые влияют на процесс переноса в воздухе или через поверхность объекта. Противодействие переносу влаги в атмосферу зависит, например, от шероховатости поверхности; в аридных и полуаридных районах чрезвычайно большое значение имеют размер и форма испаряющей поверхности. Транспирация растений, помимо уже отмеченных метеорологических и поверхностных факторов, в значительной степени определяется характеристиками и параметрами реагирования растений. Это включает, например, количество и размер устьиц (устьичные отверстия на листьях), а также то, открыты они или закрыты. Устьичное сопротивление переносу влаги характеризуется поведением растения в течение суток, но также в значительной степени зависит от поступления почвенной влаги к корневой системе.

Поступление почвенной влаги к корням и испарение с открытой почвы зависят от количества и характеристик почвенных капилляров, а именно от текстуры и состава почвы. На испарение с поверхностей озер и водохранилищ влияет тепло, аккумулируемое водоемом.

Методы оценки испарения и суммарного испарения являются как правило косвенными: либо посредством точечных измерений при помощи прибора или измерительной установки, либо путем расчета с использованием других измеренных метеорологических переменных (WMO, 1997).

#### 10.1.4 Методы измерения

Прямые измерения испарения или суммарного испарения с обширных естественных водных поверхностей или суши в настоящее время осуществить затруднительно. Однако разработано несколько косвенных методов на основе точечных измерений или других расчетов, которые дают приемлемые результаты.

Потеря воды со стандартной насыщенной влагой поверхности измеряется с помощью приборов для измерения испарения (эвапориметров), которые можно разделить на атомометры и испарители, или испарительные бассейны. Эти приборы непосредственно не измеряют ни испарение с естественных водных поверхностей, ни действительное, ни потенциальное суммарное испарение. Поэтому без внесения поправок полученные значения не могут быть использованы для надежной оценки испарения или действительной и потенциальной эвапотранспирации с естественных поверхностей.

Почвенный испаритель (лизиметр) представляет собой сосуд (или контейнер), установленный в грунте вровень с его поверхностью и наполненный почвой, на которой может быть выращена растительность. Он представляет собой многоцелевой прибор для изучения нескольких фаз гидрологического цикла в естественных условиях. Оценки суммарного испарения (или испарения в том случае, если почва лишена растительности)

могут производиться путем измерения и расчета всех остальных компонентов водного баланса контейнера, таких как выпадение осадков, дренаж подземных вод и изменение запаса воды почвенного монолита. Как правило, поверхностный сток устраняется. Почвенные испарители могут также использоваться для оценки потенциального испарения с почвы или потенциального суммарного испарения почвы, покрытой растительностью, при условии поддержания влажности почвы на уровне полевой влагоемкости.

Для водохранилищ или озер, стоковых площадок или небольших водосборов оценки испарения могут производиться на основании водного и энергетического балансов, а также с использованием аэродинамического подхода и подхода с учетом дополнительных взаимосвязей. Вышеуказанные методики описываются в 10.5.

Следует также подчеркнуть, что различные испарители или лизиметры представляют различающиеся по физической природе средства измерений. Поправочные коэффициенты, которые требуются для того, чтобы они представляли данные измерений испарения с озера или действительного либо потенциального суммарного испарения, неизбежно являются различными. Таким образом, такие приборы и их установка должны описываться очень тщательно и точно, чтобы иметь как можно более полное представление об условиях, в которых производились измерения.

Более подробное описание всех методов представлено в публикации ВМО (2008), тома I и II.

## 10.2 АТМОМЕТРЫ

### 10.2.1 Виды приборов

Атмометр — это прибор для измерения испарения с увлажненной пористой поверхности. Увлажненные поверхности представляют собой либо пористые керамические шарики, цилиндры или пластины, либо открытые диски из фильтровальной бумаги, насыщенные водой. Испаряющим элементом атмометра Ливингстона является керамический шарик диаметром около 5 см, соединенный с сосудом с водой стеклянной или металлической трубкой. Атмосферное давление на поверхности воды в резервуаре поддерживает шарик в насыщенном состоянии. Атмометр Беллани состоит из керамического диска, зафиксированного сверху глазурованной керамической воронки, в которую вода попадает через бюретку, выполняющую роль резервуара и измерительного устройства. Испаряющим элементом испарителя Пише является диск из фильтровальной бумаги, прикрепленный к перевернутой цилиндрической градуированной трубке, закрытой с одной стороны; из этой трубки вода поступает на диск. Последовательные измерения объема воды, оставшейся в градуированной трубке, позволяют оценить количество воды, потерянной на испарение за любой заданный промежуток времени.

### 10.2.2 Измерение с помощью атмометров

Хотя принято считать, что атмометры дают относительную меру испарения с поверхности растений, в действительности полученные данные измерений мало связаны с испарением с естественных поверхностей.

Показания испарителей Пише при условии их тщательной, стандартизированной, экранированной установки с определенным успехом использовались для получения аэродинамической составляющей; умножение функций ветра и дефицита насыщения водяного пара необходимы для расчета испарения при использовании, например, комбинационного метода Пенмана после получения корреляций между ними.

Хотя испарение, измеренное с помощью атмометров, вероятно, может быть эмпирически связано с испарением с естественной поверхности, можно предполагать,

что эта связь для разных типов поверхности и климата будет различной. Вероятно, атмометры будут по-прежнему применяться в мелкомасштабных исследованиях. Их существенные преимущества — это небольшой размер, низкая цена и малый расход воды. Густая сеть атмометров может быть расположена на небольшой площадке для микрометеорологических исследований. Не рекомендуется использовать атмометры для исследований в области водных ресурсов, если имеются другие данные.

### 10.2.3 **Источники ошибки в атмометрах**

Одна из основных проблем в работе атмометров — это поддержание чистоты испарительных поверхностей. Загрязненные поверхности существенно влияют на скорость испарения точно так же, как это происходит со смоченным термометром в психрометрии.

Кроме того, на измерения испарения значительное влияние часто оказывают различия в их размещении. Это особенно касается размещения по отношению к потоку движущегося воздуха вблизи испаряющей поверхности в том случае, если прибор экранирован.

## 10.3 **ИСПАРИТЕЛИ И ИСПАРИТЕЛЬНЫЕ БАСЕЙНЫ**

Изготавливаемые испарители и испарительные бассейны имеют самые различные формы и размеры, и существуют разные способы их размещения. Среди различных типов используемых испарителей следует отметить испаритель класса «А» (США), испаритель ГГИ-3000 (Россия) и испарительный бассейн площадью 20 м<sup>2</sup> (Россия), описание которых приводится ниже. В настоящее время эти приборы широко применяются в качестве стандартных сетевых приборов для измерения испарения, и их характеристики изучались в самых разнообразных климатических условиях и в большом диапазоне широты и высоты. Данные этих приборов находятся в тесной, хотя сложной и зависящей от климатической зоны, связи с метеорологическими элементами, определяющими испарение, при условии точного соблюдения стандартов при изготовлении и инструкций по размещению.

Российский измерительный бассейн площадью 20 м<sup>2</sup> рекомендован в качестве международного эталонного испарителя.

### 10.3.1 **Испаритель класса А (США)**

Испаритель класса «А» (Соединенные Штаты Америки) — это цилиндрический сосуд глубиной 25,4 см и диаметром 120,7 см. Испаритель устанавливается на деревянной платформе в виде рамки с тем, чтобы дно испарителя находилось на высоте 3–5 см от поверхности земли, что обеспечивает циркуляцию воздуха под испарителем, удерживает дно испарителя выше уровня воды на поверхности земли во время дождливой погоды и обеспечивает простоту осмотра базы испарителя. Испаритель изготавливается из оцинкованного железа толщиной 0,8 мм, меди или монель-металла, причем поверхность испарителя не окрашивается. Испаритель заполняется на 5 см ниже верхней кромки (так называемый эталонный уровень).

Уровень воды измеряется с помощью крючковой рейки или стационарной игольчатой водомерной рейки. Крючковая рейка состоит из подвижной шкалы и верньера с крючком, конец которого при правильной установке прибора касается поверхности воды. Успокоитель с небольшим отверстием на дне диаметром около 10 см и глубиной около 30 см разбивает любые мелкие волны, которые могут возникнуть в испарителе, и служит в качестве держателя для крючковой рейки во время наблюдения. Испаритель пополняется, как только уровень воды по показаниям водомерной рейки опускается более чем на 2,5 см ниже исходного уровня.

### 10.3.2 **Испаритель ГГИ-3000 (Россия)**

Испаритель ГГИ-3000 (Россия) — это цилиндрический сосуд с коническим дном и площадью поверхности 3 000 см<sup>2</sup> и глубиной 60 см. Испаритель устанавливается в грунте, причем его края на 7,5 см выступают над поверхностью земли. В центре испарителя находится металлическая мерная трубка, на которую при измерениях испарения устанавливают объемную бюретку. Бюретка снабжена клапаном, который открывается, для того чтобы уровень воды в ней сравнялся с уровнем воды в испарителе. Затем клапан закрывается, и производится точное измерение объема воды в бюретке. Уровень воды над металлической мерной трубкой определяется на основе объема воды в бюретке и ее размеров. Указатель, прикрепленный к металлической реперной трубке, показывает высоту, на которую необходимо установить уровень воды в испарителе. Уровень воды следует поддерживать таким образом, чтобы он не опускался ниже или не поднимался выше острия указателя более чем на 5 и 10 мм соответственно. Обычно рядом с испарителем ГГИ-3000 устанавливается дождемер ГГИ-3000 с приемной площадью 3 000 см<sup>2</sup>.

### 10.3.3 **Испарительный бассейн площадью 20 м<sup>2</sup> (Россия)**

Этот испарительный бассейн представляет собой цилиндрический бак с плоским дном площадью 20 м<sup>2</sup>, глубиной 2 м и диаметром 5 м. Он изготавливается путем сварки 4-5-миллиметровых листов железа и устанавливается в грунте, причем его края выступают над землей на 7,5 см. Внутренняя и выступающая внешняя поверхности бака окрашены в белый цвет. Бассейн оборудован специальным доливным баком и успокоителем с мерной трубкой, на которую при измерении высоты уровня воды в бассейне устанавливается объемная бюретка. В успокоителе рядом с мерной трубкой установлен специальный стержень, заканчивающийся острием иглы и служащий указателем высоты, до которой должен корректироваться уровень воды в бассейне. Уровень воды должен всегда поддерживаться таким образом, чтобы он был не ниже и не выше острия иглы более чем на 5 и 10 мм соответственно. К доливному баку прикреплена стеклянная трубка с делениями для измерения количества воды, доливаемой в испарительный бассейн, и для грубого контроля измерений по бюретке.

### 10.3.4 **Измерения с помощью испарителей и испарительных бассейнов**

Скорость испарения измеряется путем наблюдения изменения уровня свободной поверхности воды в испарителе или бассейне. Эти измерения можно проводить с помощью таких устройств, описанных выше, как испарители класса «А» и ГГИ-3000 соответственно.

Используется несколько типов автоматических испарителей. Уровень воды в таком испарителе поддерживается путем постоянного долива воды в испаритель из доливного бака или отлива воды из испарителя после дождя. Количество доливаемой или отливаемой воды регистрируется. В некоторых испарительных бассейнах или испарителях уровень воды непрерывно регистрируется с помощью поплавка в успокоителе. Поплавок приводит в действие самописец.

Измерения испарения с поверхности испарителя положены в основу ряда методик для оценки испарения и суммарного испарения с естественных поверхностей, потеря воды которыми представляет интерес. Измерениям, производимым с помощью испарителей, отдается предпочтение, поскольку в любом случае они являются результатом воздействия всех метеорологических параметров, а данные измерений можно получить сразу же и за любой требуемый период времени. Поэтому испарители часто используются для получения текущей информации об испарении в пределах наблюдательной сети.

### 10.3.5 Размещение испарителей и испарительных бассейнов

Для испарителей и испарительных бассейнов в основном используются следующие три вида размещения:

- a) размещение в грунте, когда основная емкость испарительного бассейна расположена ниже уровня земли, при этом испаряющая поверхность находится на уровне поверхности земли или вблизи нее;
- b) размещение над землей, когда весь испаритель и испаряющая поверхность находятся на небольшой высоте над поверхностью земли;
- c) размещение на заякоренных плавающих платформах на озерах или других водных объектах.

Испарительные площадки должны размещаться на совершенно ровных и открытых участках, свободных от всякого рода препятствий, таких как деревья, здания, кустарники или приборные будки. Расстояние между такими отдельными препятствиями, если они небольшого размера, и испарителем должно быть в пять раз больше их высоты над испарителем; для препятствий, образующих скопления, это расстояние должно быть в 10 раз больше. Участки должны быть достаточно большими, чтобы на показания не влиял снос струй или краевые эффекты со стороны участка с сельскохозяйственной культурой или какие-либо другие. Такие эффекты могут распространяться на расстояние более 100 м. Участок должен быть огорожен, чтобы защитить приборы и не допустить к воде животных; однако ограда должна быть устроена таким образом, чтобы не нарушать структуру поля ветра над испарителем.

Покров поверхности испарительной площадки следует поддерживать в состоянии как можно близком к естественному покрову, характерному для данной территории. Траву, сорняки и тому подобное необходимо регулярно скашивать, для того чтобы их высота не превышала высоту кромки испарителя (7,5 см). Такая же высота травы (менее 7,5 см) предпочтительна также для испарителей класса «А». Прибор ни в коем случае нельзя устанавливать на бетон, асфальт или гравий. Испарители этого типа не следует закрывать от солнца.

### 10.3.6 Источники ошибки в испарителях и испарительных бассейнах

От способа установки испарителя зависят как различные преимущества, так и источники ошибок при измерениях.

Испарители, установленные над поверхностью земли, дешевы, и их легко устанавливать и обслуживать. Они чище установленных в грунте испарительных бассейнов, поскольку грязь не смывается в них в больших количествах с окружающей поверхности. Любую утечку, возникшую после установки, легко обнаружить и устранить. Однако количество испарившейся воды больше, чем из установленных в грунте испарителей, главным образом, за счет дополнительной лучистой энергии, поглощаемой через боковую поверхность. Нежелательное воздействие стенки испарителя можно в значительной степени исключить, используя защищенный испаритель, но это приводит к его удорожанию, нарушению стандартных инструкций и изменению «устойчивых связей», упомянутых в 10.3.

Размещение испарителя в грунте способствует уменьшению нежелательных граничных эффектов, таких как влияние излучения на боковую поверхность и теплообмен между собственно испарителем и атмосферой. Однако недостатками являются следующие:

- a) в испарителе накапливается больше ненужных веществ, и его трудно очищать;
- b) течь трудно обнаружить и устранить;

- с) высота окружающей растительности является в некоторой степени более критичной. Кроме того, имеет место значительный теплообмен между водной массой испарителя и почвой, и это зависит от многих факторов, включая тип почвы и ее влагосодержание, а также растительный покров.

В случае плавучего испарителя условия более приближены к испарению с поверхности озера, чем к испарению с прибрежного испарителя, установленного или над землей или на уровне земли, хотя способности аккумулировать тепло у плавучего испарителя и у озера различны. На плавучий испаритель, однако, оказывает влияние то озеро, в котором он находится, и испаритель не всегда является хорошим индикатором испарения с поверхности озера. Имеются значительные трудности при проведении наблюдений и, в частности, забрызгивание и выплескивание часто ухудшают репрезентативность данных. Установка и эксплуатация таких испарителей требуют значительных затрат.

При любом способе размещения важно, чтобы испаритель был изготовлен из нержавеющей стали, и чтобы все соединения были прочными и не давали течи.

Сильный дождь и очень сильный ветер могут вызвать выплескивание из испарителей, в результате чего измерения могут стать ошибочными.

Имеет значение уровень водной поверхности в испарителе. Если испаритель переполнен, то до 10 % (или более) любых жидких осадков может вылетать из него в виде брызг, что приведет к завышенной оценке испарения. Слишком низкий уровень воды приведет к уменьшенной скорости испарения (2,5 % на каждый сантиметр ниже 5-сантиметрового исходного уровня в районах с умеренным испарением) в результате затененности бортиком. Если допустить очень низкий уровень воды, то скорость испарения увеличивается за счет повышенного нагрева водной поверхности.

Рекомендуется ограничить допустимый интервал изменения уровня воды либо с помощью автоматических методов, путем подгонки уровня при снятии каждого показания, либо путем отлива или долива воды, когда уровень достигает верхней или нижней отметок соответственно.

### 10.3.7 Обслуживание испарителей и испарительных бассейнов

Осмотр следует проводить не реже одного раза в месяц, уделяя особое внимание обнаружению течи. Испаритель следует чистить по мере необходимости, удаляя мусор, осадок, водоросли и нефтяные пленки. Рекомендуется добавление в воду небольшого количества медного купороса или других альгицидов для ограничения роста водорослей.

Если вода замерзает, необходимо сколоть весь лед со стенок испарительного бассейна и, пока лед плавает, произвести замеры уровня. Если лед разрушен, то тот факт, что часть воды находится в замерзшем состоянии, незначительно влияет на ее уровень. Если толщина льда не позволяет его расколоть, измерения следует отложить до того времени, когда это можно будет сделать; тогда испарение следует определять за более продолжительный период времени.

Нередко приходится защищать испаритель от птиц и мелких животных, особенно в засушливых и тропических районах. Это можно обеспечить с помощью использования следующих средств:

- a) химических репеллентов. Во всех случаях использования такой защиты необходимо принимать меры, чтобы физические характеристики воды в испарителе значительно не изменялись;
- b) проволочной сетки, натянутой над испарителем. Стандартные сетки такого типа широко используются в ряде районов. Они защищают воду от птиц и животных, но они уменьшают потери на испарение за счет частичного экранирования поверхности воды от солнечной радиации и уменьшения интенсивности движения воздуха

над водной поверхностью. Для оценки ошибки, обусловленной воздействиями проволочной сетки на поле ветра и тепловые характеристики испарителя, рекомендуется сравнить показания защищаемого испарителя с показаниями стандартного испарителя, расположенного на ближайшей подходящей для сравнения площадке. Испытания с предохранительным цилиндром, который изготовлен из 25-миллиметровой стальной сетки с шестиугольными ячейками, удерживаемой каркасом из 8-миллиметровых стальных прутьев, выявили стабильное уменьшение скорости испарения, равное 10 % за двухлетний период на трех различных площадках.

#### 10.4 ИЗМЕРИТЕЛИ СУММАРНОГО ИСПАРЕНИЯ (ЛИЗИМЕТРЫ)

Несколько типов лизиметров описано в специальной технической литературе. Подробное описание конструкций некоторых приборов, используемых в различных странах, приводится в публикациях ВМО (WMO, 1966; 2008 (том I)).

Обычно лизиметр представляет собой внутренний наполненный почвой контейнер, установленный в углублении в грунте с укрепленными стенками или в наружном заглубленном контейнере со специальными устройствами для измерения фильтрации и изменения влагосодержания почвы.

Не существует универсального международного стандартного лизиметра для измерения суммарного испарения. Площадь поверхности используемых лизиметров изменяется от 0,05 м<sup>2</sup> до нескольких сотен квадратных метров, а их глубина — от 0,1 до 5,0 м. В соответствии с принципом их действия лизиметры могут быть классифицированы как невесовые и весовые приборы. Каждый из этих типов приборов имеет свои конкретные достоинства и недостатки, и выбор какого-либо типа лизиметра зависит от поставленной задачи.

Невесовые (фильтрационный тип) лизиметры могут использоваться только для измерений, производимых через большие промежутки времени, за исключением тех случаев, когда влагосодержание почвы может быть измерено каким-либо независимым и надежным способом. Большие лизиметры фильтрационного типа используются для исследований водного баланса и суммарного испарения в том случае, если растительный покров состоит из зрелых деревьев — высоких, с глубокими корнями. Небольшие лизиметры простого типа для почвы, лишенной растительности либо покрытой травой или сельскохозяйственными культурами, могут давать результаты, полезные для практических целей во влажных условиях. Лизиметр такого типа может быть легко установлен, а стоимость его технического обслуживания невысока, благодаря чему он подходит для использования при организации сети наблюдений.

Стоимость весовых лизиметров, за исключением простых микролизиметров для измерения почвенного испарения, гораздо выше, но их преимущество заключается в том, что они обеспечивают надежные и точные оценки суммарного испарения за небольшие промежутки времени при условии соблюдения необходимых мер предосторожности в отношении конструкции, эксплуатации и размещения.

Разработано несколько видов технологий взвешивания с использованием механических и гидравлических принципов. Более простые небольшие лизиметры обычно вынимают из углубления для них и размещают на механических весах с помощью передвижных подъемных кранов. Контейнер лизиметра может быть установлен на стационарных механических весах для непрерывной регистрации показаний. Конструкция системы взвешивания и регистрации может быть значительно упрощена путем использования датчиков нагрузки и тензодатчиков с изменяющимся электрическим сопротивлением. В гидравлических системах взвешивания используется принцип вытеснения жидкости в результате изменения плавучести контейнера (так называемый плавучий лизиметр) или принцип изменения давления жидкости в гидравлических датчиках нагрузки.

Большие взвешиваемые и регистрирующие лизиметры рекомендуются для точных измерений в исследовательских центрах, а также для стандартизации и параметризации других методов измерения эвапотранспирации и ее моделирования. Взвешиваемые лизиметры небольшого размера весьма полезны и подходят для использования в сети. Микролизиметры для измерения испарения с почвы – это относительно новое средство измерений.

#### 10.4.1 Измерение с помощью лизиметра

Скорость суммарного испарения можно определить из обобщенного уравнения водного баланса для контейнеров лизиметра. Значение суммарного испарения равно количеству осадков (или воды при поливе) за вычетом количества просочившейся (дренированной, отфильтрованной) воды изменения запаса воды в почве.

Таким образом, программа наблюдений на площадках, где установлены лизиметры, включает наблюдения за осадками (или поливом), фильтрацией и изменением запаса воды в почве. Полезно включить в эту программу также наблюдения за ростом и развитием растений.

Количество осадков (а также воды в поливе, если он имеет место) предпочтительно измерять на уровне земли стандартными методами. Сбор фильтрующейся воды производится в резервуаре, и ее объем может измеряться через регулярные интервалы времени или регистрироваться с помощью прибора. Для точных измерений изменения водных запасов используются точные гравиметрические методы, описанные выше. При взвешивании лизиметр следует экранировать во избежание воздействия ветровой нагрузки.

Долговременные значения суммарного испарения вполне удовлетворительно можно оценивать с применением объемного метода. С помощью этого метода производятся измерения осадков и фильтрации. Допускается, что за период между наблюдениями изменение запаса воды стремится к нулю. Изменения влагосодержания почвы могут быть определены путем доведения содержания влаги в почве до значения, характерного для полевых условий в начале и конце этого периода.

#### 10.4.2 Размещение измерителей суммарного испарения

Наблюдения за суммарным испарением должны учитывать растительный покров и условия влажности на общей территории вокруг станции (ВМО, 2015). Для имитации репрезентативных значений интенсивности суммарного испарения почва и растительный покров лизиметра должны соответствовать почве и растительному покрову окружающей территории, а любые неблагоприятные эффекты, вызванные присутствием приборов, должны быть сведены к минимуму. Наиболее важные требования к размещению лизиметров описаны ниже.

Для обеспечения сохранения гидромеханических свойств естественной почвы рекомендуется поместить ее в контейнер в виде целого блока (монолита). В случае почвы рыхлого, довольно однородного типа и при наличии большого контейнера достаточно наполнить контейнер слой за слоем в той же последовательности и с той же плотностью, как и в натуральном разрезе почвы.

С целью моделирования естественного дренажного процесса в контейнере следует обеспечить свободный дренаж у его дна. В зависимости от текстуры почвы может оказаться необходимым обеспечить искусственное отсасывание на днище лизиметра посредством разрежения воздуха.

Лизиметр, кроме микролизиметров, предназначенных для измерения испарения почвы, должен быть достаточно большим и глубоким, а его кромка низкой настолько это практически возможно, чтобы получить репрезентативный, свободно растущий зеленый покров без каких-либо ограничений для его развития.

В целом, расположение лизиметров зависит от требований, связанных с препятствиями для ветра, таких же, как требования к установке испарительных бассейнов, а именно: площадка должна быть расположена вне зоны влияния зданий, даже одиночных деревьев, метеорологических приборов и т. д. Для того чтобы свести к минимуму эффекты адвекции, площадки с лизиметрами следует располагать на достаточном расстоянии от влияющих на поле ветра препятствий, имеющихся на окружающей территории, т. е. на расстоянии не менее чем 100–150 м. Предотвращение эффектов адвекции очень важно при измерениях, проводимых на орошаемых землях.

#### 10.4.3 **Источники ошибки в измерениях с помощью лизиметров**

Для измерений с помощью лизиметров характерно несколько источников ошибки, возникающей вследствие нарушения естественных условий самим прибором. Ниже перечислены некоторые основные факторы:

- a) ограниченный рост корневой системы;
- b) изменение турбулентной диффузии в результате нарушения однородности растительного покрова между лизиметром и окружающей территорией. Любое нарушение однородности может быть обусловлено наличием кольцеобразного слоя, образованного стенкой контейнера и подпорными стенами, а также в результате возникновения различий в самом растительном покрове;
- c) недостаточная тепловая эквивалентность лизиметра и окружающей почвы в результате следующих причин:
  - i) термоизоляции от подпочвенного слоя;
  - ii) термических эффектов воздуха, поднимающегося или опускающегося между контейнером и стенками углубления;
  - iii) изменения термических свойств почвы вследствие изменения ее структуры и влажности;
- d) недостаточная эквивалентность водного баланса в лизиметре и в окружающей почве в результате:
  - i) нарушения структуры почвы;
  - ii) ограниченного дренажа;
  - iii) вертикальной фильтрации через стенки углубления;
  - iv) предотвращения стока с поверхности и поперечного движения почвенной влаги.

Существует несколько удобных способов сведения к минимуму ошибок, возникающих при измерениях лизиметрами (например, регулировка температуры под контейнером, сокращение вертикальной фильтрации стен с помощью колец с фланцами и т. д.). Помимо требований к точному воспроизведению конструкции оборудования лизиметра, особенно большое значение имеет достаточная репрезентативность растительности и типа почвы для изучаемой местности. Более того, местоположение площадки почвенного испарителя должно быть полностью репрезентативным для естественных полевых условий.

#### 10.4.4 **Обслуживание лизиметров**

Для обеспечения репрезентативности растительного покрова в лизиметре необходимо учитывать несколько факторов. Все сельскохозяйственные и другие работы (сев, внесение удобрений, жатва и тому подобное) в контейнере и на окружающей территории должны проводиться одинаково и одновременно. Во избежание ошибок, связанных с атмосферными осадками, растения около и внутри контейнера должны поддерживаться в вертикальном положении, а опавшие листья и сломанные стебли не должны находиться на поверхности лизиметра.

Обслуживание технических устройств является специфическим для каждого вида приборов и его описание не может быть дано в этом документе.

Желательно, по крайней мере, один раз в год проверять измеритель суммарного испарения на течь путем экранирования его поверхности для предотвращения суммарного испарения и последующего наблюдения в течение нескольких дней за объемом дренажа, который должен быть равен количеству воды, добавленной на его поверхность.

#### 10.5 **ОЦЕНКА ИСПАРЕНИЯ С ЕСТЕСТВЕННЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ**

Как показано в 10.1.3, анализ факторов, влияющих на испарение, свидетельствует о том, что скорость испарения с естественных поверхностей обязательно будет отличаться от скорости испарения с измерителя испарения, установленного в таких же атмосферных условиях, поскольку физические характеристики двух испаряющих поверхностей не идентичны.

На практике интерес представляет скорость испарения или суммарного испарения с естественных поверхностей, например, испарение с поверхности водохранилища или озера, с территорий, занятых сельскохозяйственными культурами, а также пространственное распределение испарения с таких обширных поверхностей суши, как районы водосбора.

В частности, точные пространственные оценки суммарного испарения в регионах с различными характеристиками поверхности и формами землепользования получить очень трудно (WMO, 1966, 1997).

Подходящие методы для оценки испарения с поверхности озера или водохранилища — это использование водного баланса, энергетического баланса и аэродинамических подходов, метода комбинирования аэродинамических и энергобалансовых уравнений и взаимодополняющей связи между действительным и потенциальным испарением. Кроме того, в ряде методик испарение, измеренное с помощью испарителя, используется для установления связи озеро-испаритель. Эти связи являются специфическими для каждого типа испарителя и способа их размещения. Они также зависят и от климатических условий (см. WMO, 1985, 2008 (том I, глава 4)).

Значения в точке или ареале не ограниченного наличием воды суммарного испарения с поверхности суши, покрытой растительностью, могут быть получены путем определения такого потенциального суммарного испарения (или суммарного испарения для эталонной сельскохозяйственной культуры) методами, аналогичными уже вышеописанным методам для озер, но адаптированными к условиям растительности. Некоторые методы используют дополнительные коэффициенты зависимости от стадии роста для каждого вида растительности, такой как сельскохозяйственные культуры, и/или интегрированное значение устьичного сопротивления, характерное для растительности в целом.

Королевский Нидерландский метеорологический институт применяет следующую процедуру, разработанную Г. Ф. Маккинком (Hooghart, 1971) для расчета суточного (24 ч) эталонного испарения растительности при среднесуточной температуре воздуха и суточном количестве суммарной радиации:

если давление насыщенного водяного пара при температуре воздуха  $T$ :

$$e_s(T) = 6,107 \cdot 10^{7,5 \cdot \frac{T}{237,3+T}} \quad \text{гПа}$$

наклон кривой насыщенного водяного пара в зависимости от температуры  $T$ :

$$\Delta(T) = \frac{7,5 \cdot 237,3}{(237,3+T)^2} \cdot \ln(10) \cdot e_s(T) \quad \text{гПа/}^\circ\text{C}$$

психрометрический коэффициент:

$$\Delta(T) = 0,646 + 0,0006T \quad \text{гПа/}^\circ\text{C}$$

удельная теплота испарения воды:

$$\lambda(T) = 1\,000 \cdot (2\,501 - 2,38 \cdot T) \quad \text{Дж/кг}$$

плотность воды:

$$\rho = 1\,000 \quad \text{кг/м}^3$$

суммарная суточная радиация (количество за 24 ч):

$$Q \quad \text{Дж/м}^2$$

температура воздуха (среднесуточная):

$$T \quad ^\circ\text{C}$$

тогда суточное эталонное испарение (суточная интенсивность испарения) с растительности:<sup>1</sup>

$$E_r = \frac{1000 \cdot 0,65 \cdot \delta(T)}{\{\delta(T) + \gamma(T)\} \cdot \rho \cdot \lambda(T)} \cdot Q \quad \text{мм}$$

Связывая измеренное значение интенсивности действительного суммарного испарения с оценками не ограниченного наличием воды потенциального суммарного испарения, а затем последовательно связывая эту нормализованную величину с влагосодержанием почвы, дефицитом воды в почве или водным потенциалом в корневой зоне, можно получить коэффициенты для расчета действительной интенсивности суммарного испарения при данном влагосодержании.

Значения действительного суммарного испарения с земной поверхности могут оцениваться и непосредственно в ходе наблюдений за изменениями влагосодержания почвы путем измерений влажности почвы на регулярной основе. Можно произвести измерения более точно, используя весовой лизиметр. В других методах применяются измерения турбулентности (например, метод корреляции турбулентного потока) и измерения профилей (например, методы использования данных для пограничного слоя, а также метод расчета коэффициента энергетического баланса Боуэна на двух уровнях). Эти методы более дорогостоящие, для их реализации требуются специальные приборы и датчики влажности, скорости ветра и температуры. Такие оценки для изучаемых типов почв и растительного покрова могут быть использованы в качестве надежных независимых справочных данных при выявлении эмпирических связей в процессе моделирования суммарного испарения.

При определении суммарного испарения с поверхности бассейна возникает проблема, связанная с тем, что в случае нарушения непрерывности характеристик поверхности

<sup>1</sup> Константа 1000 используется для преобразования из метров в миллиметры; константа 0,65 является типичной эмпирической константой.

значения интенсивности суммарного испарения в пределах рассматриваемой территории становятся различными. При рассмотрении значений, полученных в результате измерений через короткие промежутки времени, необходимо оценивать суммарное испарение с использованием эмпирических связей. Для оценки суммарного испарения с поверхности водного бассейна за большой период времени (в целях сведения к минимуму эффектов накопления) может быть использован метод водного баланса (см. WMO, 1971). Один из подходов, применяемых для оценок испарения с обширных территорий, связан с методом водного баланса, при этом суммарное испарение по площади оценивается на основе данных радиозондирования. Информация об описанных выше методах, их преимуществах и пределах их применения представлена в публикации ВМО (2008, том I, глава 4).

Измерение испарения с поверхности снега является более сложной задачей, и, возможно, данные таких измерений менее точные, чем расчет испарения с поверхности воды.

Во многих странах для измерения испарения с поверхности снежного покрова используются испарители, изготовленные из полиэтилена или бесцветной пластмассы; наблюдения проводятся только при отсутствии снегопада.

Испарение со снежного покрова можно оценивать на основании данных наблюдений влажности воздуха и скорости ветра на одном или двух уровнях над поверхностью снежного покрова и непосредственно у поверхности с использованием уравнения турбулентной диффузии. Оценки считаются наиболее надежными, когда значения испарения вычисляются для пятидневных и более длинных периодов.

---

## СПРАВОЧНАЯ И ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА

- Всемирная метеорологическая организация, 1992: *Международный метеорологический словарь* (ВМО-№ 182). Женева.
- , 2008: *Руководство по гидрологической практике* (ВМО-№ 168), тома I и II. Женева.
- , 2015 (обновлено в 2017 г.): *Руководство по Глобальной системе наблюдений* (ВМО-№ 544), том I. Женева.
- Всемирная метеорологическая организация/Организация Объединенных Наций по вопросам образования, науки и культуры, 2012: *Международный гидрологический словарь* (ВМО-№ 385). Женева.
- Hooghart, J.C. (ed.), 1971: *Evaporation and Weather*. TNO Committee of Hydrological Research, Technical Meeting 44, Proceedings and Information No. 39, TNO, The Hague.
- World Meteorological Organization, 1966: *Measurement and Estimation of Evaporation and Evapotranspiration*. Technical Note No. 83 (WMO-No. 201, TP. 105). Geneva.
- , 1971: *Problems of Evaporation Assessment in the Water Balance* (C.E. Hounam). WMO/IHD Report No. 13 (WMO-No. 285). Geneva.
- , 1973: *Atmospheric Vapour Flux Computations for Hydrological Purposes* (J.P. Peixoto). WMO/IHD Report No. 20 (WMO-No. 357). Geneva.
- , 1976: *The CIMO International Evaporimeter Comparisons* (WMO-No. 449). Geneva.
- , 1977: *Hydrological Application of Atmospheric Vapour-Flux Analyses* (E.M. Rasmusson). Operational Hydrology Report No. 11 (WMO-No. 476). Geneva.
- , 1985: *Casebook on Operational Assessment of Areal Evaporation*. Operational Hydrology Report No. 22 (WMO-No. 635). Geneva.
- , 1997: *Estimation of Areal Evapotranspiration*. Technical Reports in Hydrology and Water Resources No. 56 (WMO/TD-No. 785). Geneva.
-