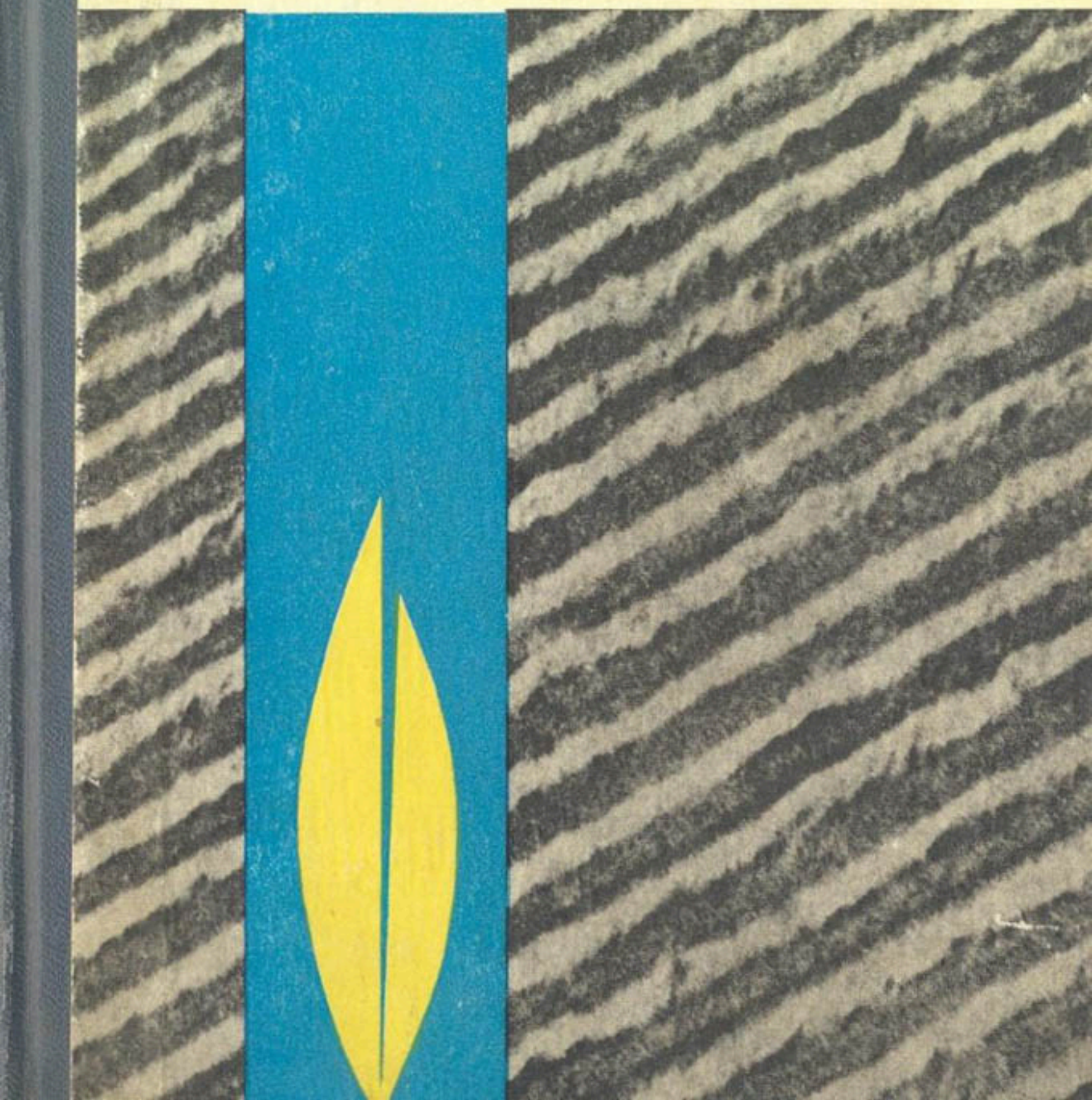
И. Г. МУШКИН

ВЛАГООБЕСПЕЧЕННОСТЬ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ПОЛЕЙ



ПРЕДИСЛОВИЕ

В последнее время большой интерес проявляется к проблеме определения потребности во влаге как отдельных растений, так и сельскохозяйственных полей. Внимание исследователей и практиков обращено на широкий круг вопросов, связанных с оценками влагообеспеченности.

В обширной литературе проблеме влагообеспеченности посвящен разнообразный материал, касающийся разработки, анализа точности и применимости методов и аппаратуры, предназначенных для количественной оценки влагообеспеченности. Слабее освещен вопрос о возможных критериях полива и репрезентативности отдельных приемов учета влагообеспеченности. Для определения потребности во влаге отдельного растения, небольшой площадки или производственного поля рекомендуется использовать различные способы, в зависимости от поставленной задачи.

В данной работе дается обзор известных методов как диагностики состояния растений, так и оценки обстановки в среде обитания, применяемых в настоящее время при определениях влагообеспеченности. Рассматриваются основные распространенные методические схемы, перспективные аппаратурные разработки, а также расчетные оценки влагообеспеченности с точки зрения их обоснованности, возможности выявления систематических ошибок и определения инструментальной точности, степени репрезентативности отдельных измеряемых параметров в пространстве и во времени, повторяемости, воспроизводимости и достоверности результатов наблюдений при применении какого-то метода определения влагообеспеченности.

Как принципы, положенные в основу методик, приборов и измерительных комплексов, так и схемы их реализации отражают технический уровень к моменту их разработки. Часть из них нуждается в усовершенствовании и в дальнейшем будет подвергнута доработке, хотя основные идеи, на которых они основаны, несомненно, сохранятся.

Материал в книге группируется по основному принципу измерений: физиологические параметры диагностики состояния

растений, оценки доступности почвенной влаги, расчетные методы определения комплексных гидрометеорологических характеристик по данным косвенных измерений. Основное внимание уделяется последней группе методов, относительно менее распространенной и наиболее перспективной с точки зрения автоматизации определения влагообеспеченности и использования этих методов в системах автоматического управления поливом.

Знакомство с описанными способами оценки влагообеспеченности даст возможность более обоснованно подойти к рациональному выбору методов и аппаратуры в каждом конкретном случае и обеспечит получение необходимой информации при минимальных затратах труда и средств.

В работе над монографией принимал участие кандидат технических наук Ю. А. Песчанский, написавший § 6 и 7 в главе III и высказавший ряд ценных замечаний по работе. Автор выражает искреннюю благодарность кандидату биологических наук С. Л. Пумпянской и кандидату физико-математических наук М. А. Каганову за весьма важные рекомендации и советы. Автор благодарит также сотрудников лаборатории информационных устройств Агрофизического института и старшего научного сотрудника этого института кандидата физико-математических наук М. Г. Санояна за помощь в работе и обсуждение проблем, нашедших отражение в данной книге.

Автор сердечно благодарит профессора А. Ф. Чудновского, взявшего на себя научное редактирование и приложившего немало усилий к улучшению данной работы.

ВВЕДЕНИЕ

В процессах преобразования энергии и вещества, происходящих в растительном организме, вода играет решающую роль. Она не только входит одним из главных компонентов в продукты фотосинтетических реакций, но и является основным переносчиком элементов питания.

Существенной функцией воды в жизнедеятельности растений, помимо непосредственного участия в процессах фотосинтеза, является обеспечение терморегуляции и отвода избыточной энергии. При реальных коэффициентах полезного действия фотосинтетических реакций порядка долей процента основная часть энергии излучения, приходящей от солнца, рассеивается в воздухе посредством теплоотдачи и путем испарения влаги с листьев. Фактическая потребность растения в воде многократно превышает не только расход на фотосинтез, но и необходимый минимум циркуляции, обеспечивающий потребности минерального питания и сброса побочных продуктов реакций.

Анализ влагообеспеченности является исключительно трудной задачей, поскольку в процессах подачи влаги к растению участвует такая сложная с биологической и физической точек зрения система, как почва. Для оценки степени этих трудностей достаточно указать на одну из особенностей почвенных процессов — антагонизм воздухо- и влагосодержания почвы. Так, необходимость газообмена корневой системы практически исключает возможность использования режимов с избыточным увлажнением почвы, в которых потребление влаги регулировалось бы самим растением.

Исследования влагообеспеченности привлекают внимание самых различных специалистов, так как в процессе вегетации на растение оказывает влияние большое число факторов, воздействие которых нельзя рассматривать раздельно. Выделение элементарных воздействий весьма сложно, а порой и невозможно, поэтому достоверность результатов и надежность измерений часто оказываются недостаточными, и для обеспечения эффективности подобных исследований необходимо участие в них специалистов различного профиля: физиков, физиологов, агрометеорологов, почвоведов и т. д.

Следует сразу же оговорить, что, употребляя далее термин «сельскохозяйственное поле», мы будем иметь в виду почвенный массив поля вместе с произрастающими на нем растениями. Таким образом, понятие влагообеспеченности сельскохозяйственного поля по существу совпадает с понятием влагообеспеченности растений на этом поле независимо от того, каким образом определена эта величина. Рассматривая в дальнейшем вопросы оценок влагообеспеченности, мы будем применять оба термина. О влагообеспеченности растения будет идти речь в тех случаях, когда имеется в виду диагностика состояния отдельного растения или группы растений. В случае оценки больших массивов будет использоваться термин «влагообеспеченность поля».

Оценка потребления влаги, или степени влагообеспеченности, производится по различным параметрам или факторам, определяющим доступность для растений имеющихся запасов влаги. В зависимости от сочетания свойств самих растений и условий среды имеющаяся влага оказывается достаточной или недостаточной для нормального развития.

Выделяют три основные группы факторов, воздействующих на потребление влаги растением: 1) факторы, связанные с самим растением, — засухоустойчивость, объем корневой системы и наземной части, стадия развития и т. п.; 2) почвенные факторы — энергия связи влаги в почве, наличие и состав солей, влагопроводность почв и т. д.; 3) климатические факторы — радиационный режим подстилающей поверхности и приземного слоя атмосферы, температура и влажность воздуха, интенсивность испарения и т. д.

Весьма важным представляется правильный выбор критериев оценки влагообеспеченности. Очевидно, в качестве одного из критериев нужно было бы использовать непосредственно интенсивность физиологических процессов, обеспечивающих накопление полезных продуктов в урожае. Такой подход наиболее полно соответствует решению задачи оптимизации условий выращивания растений для получения максимального выхода полезной продукции. Однако из-за сложности определений подобных показателей можно использовать и другие параметры, отражающие общее состояние растений (транспирацию, концентрацию клеточного сока и т. п.), прямо не связанные с выработкой конечных продуктов фотосинтеза, а также некоторые вторичные физиологические характеристики (перемещение сока в стебле, температура листа), которые можно использовать для диагностики состояния растений при оценках их влагообеспеченности.

С другой стороны, водное питание растений достаточно полно может быть охарактеризовано с помощью показателей запасов почвенной влаги, которые позволяют оценить величину работы, затрачиваемой растением для переноса влаги из почвы в лист, и поэтому могут быть использованы в качестве критериев влагообеспеченности.

Гидрометеорологические параметры, которые применяются при оценках влагообеспеченности полей, по существу также являются вторичными, так как они прямо не связаны ни с процессами фотосинтеза, ни с количеством влаги в почве, хотя значения этих параметров определяются всем комплексом условий развития растений. В последнее время оценка влагообеспеченности полей по этой группе факторов (гидрометеорологическим параметрам) получает все большее распространение из-за некоторых практических удобств применения подобных показателей.

Информация о влагообеспеченности растений и сельскохозяйственных полей в быстро нарастающих масштабах используется не только научными учреждениями, она требуется и сельскохозяйственным предприятиям для управления поливом на полях. Влагообеспеченность необходимо знать не только при исследованиях, непосредственно затрагивающих проблемы водного обмена, но и при различных агрономических и селекционно-генетических работах, в которых нарушение режима водного питания может привести к серьезным ошибкам в результатах опытов. Для развития комплексных научных исследований на отдельных растениях и на полях необходимо широко внедрять автоматизированную аппаратуру для оценок их влагообеспеченности, так как во многих случаях этот фактор оказывается решающим с точки зрения результатов эксперимента, трудоемкость же таких оценок весьма высока.

Земледелие закрытого грунта открывает возможности максимальной интенсификации сельскохозяйственного производства и использования потенциальных возможностей растений как в отношении массы урожая, так и по качеству продукции. При эксплуатации культивационных сооружений необходима оперативная информация о наличии влаги, которая является одним из важнейших факторов оптимизации условий роста. В этом случае могут быть наиболее полно использованы технические возможности регулирования режимов выращивания растений.

Вопросы оптимизации режимов выращивания сельскохозяйственных культур и получения исчерпывающей информации об условиях жизнедеятельности растений на открытом поле решаются значительно сложнее.

С точки зрения влагообеспеченности поля районы традиционного земледелия в первом приближении могут быть условно разделены на зону достаточного увлажнения и зону дефицита влаги. Лимитирующими факторами, ограничивающими возможности получения устойчиво высоких урожаев, для первой зоны являются, как правило, недостаточная интенсивность солнечной радиации, а иногда и низкая температура, для второй зоны — дефицит влаги. При этом в зоне достаточного увлажнения во многих случаях необходимо строительство гидромелиоративных сооружений и двухстороннее регулирование водного режима сельскохозяйственных полей. Ни одно из этих гидромелиоративных мероприятий

не может быть выполнено без оценки фактической влагообеспеченности поля.

Ставя задачу оптимизации условий выращивания в открытом грунте, трудно представить себе реальные возможности коррекции радиационного режима и температуры для сколько-нибудь значительных площадей. Следовательно, можно ставить вопрос только о регулировании режимов минерального и водного питания.

Хорошо поставленная агрохимическая служба может дать еще до начала вегетационного периода прогноз минерального обеспечения с учетом желательной массы урожая. Такой прогноз обладает достаточной надежностью, так как концентрация химических элементов относительно стабильна и меняется медленно. В данном случае нет необходимости в оперативных автоматических измерениях элементов питания непосредственно в поле, для этого можно использовать данные обработки статистических рядов.

Значительно сложнее решается вопрос влагообеспеченности. Здесь необходимы два типа прогнозов: долгосрочный прогноз на вегетационный период в целом и краткосрочный оперативный прогноз для отдельного поля, который может быть использован для управления поливом. Долгосрочный прогноз влагообеспеченности поля, как правило, основывается на учете накопления влаги в осенне-зимний период и дает удовлетворительные результаты для больших районов или бассейнов рек. В краткосрочных прогнозах необходимо учитывать связи влагообеспеченности с весьма изменчивыми локальными значениями метеорологических параметров, прогноз которых статистически оправдывается для относительно коротких периодов времени. При неизбежных вариациях микроклимата краткосрочный прогноз для больших районов практически не позволяет оперативно управлять водным режимом применительно к отдельным сельскохозяйственным полям.

В отличие от элементов минерального питания, количество доступной влаги на отдельном поле может изменяться относительно быстро, и для регулирования влагообеспеченности необходима оперативная информация о наличии влаги и ее использовании растительным покровом непосредственно на данном поле. На основании информации такого рода могут составляться краткосрочные прогнозы влагообеспеченности поля, которые будут использоваться в комплексах автоматического управления поливом. Эти же данные необходимы для электронных устройств, предназначенных для распределения влаги в оросительных системах. В процессе обработки информации должны определяться сроки и нормы полива для отдельных полей и составляться планы распределения влаги в пределах отдельного хозяйства, района или оросительной системы в целом. При наличии такой системы управления поливом внедрение технически обоснованных норм полива позволит не только избежать снижения урожая за счет дефицита влаги или угнетения растений при избыточном увлажнении, но и

даст возможность высвободить часть воды для орошения дополнительных площадей.

Недостаток фактического материала по влагообмену культурных растений в различных климатических зонах при различных условиях влагообеспеченности, минерального питания и т. п. выдвигает в качестве первоочередной задачи вопрос о научно обоснованных методах исследования данной величины. Ощущается острая потребность в аппаратуре и способах измерений, пригодных для использования в комплексных автоматизированных системах полива, предназначенных в перспективе для получения максимального полезного выхода продукции при экономном расходе воды. Такого рода задачи ставятся в первую очередь в районах Средней Азии и юга Европейской части СССР, где имеются достаточно разветвленные оросительные системы и проблема автоматизации полива должна решаться в относительно короткие сроки.

Глава I

БИОЛОГИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ДИАГНОСТИКИ ВЛАГООБЕСПЕЧЕННОСТИ РАСТЕНИЙ

Степень доступности влаги оказывает большое влияние на весь комплекс физиологических процессов в растениях. Связанные с наличием влаги изменения химического состава и физических параметров тканей имеют решающее значение для качественных характеристик урожая и количественного выхода продукции.

Многочисленные эксперименты показывают, что ряд физиологических показателей плавно меняется при изменении количества доступной влаги и может быть использован для оценок влагообеспеченности растений. К числу таких показателей относятся величина транспирации, значение корневого давления и скорости перемещения сока в стебле, интенсивность фотосинтеза и рост растений, концентрация и состав клеточного сока и т. п.

Роль той или иной физиологической характеристики может быть выявлена при анализе баланса влаги в растении.

Дефицит влагообеспеченности на разных стадиях развития растения по-разному сказывается на количестве и качестве урожая. Так, недостаток влаги в начальный период часто приводит к торможению развития корневой системы и в дальнейшем существенно ограничивает и ослабляет засухоустойчивость растений за счет уменьшения зоны водного питания в последующие периоды вегетации.

Дефицит влагообеспеченности в период созревания урожая в некоторых случаях не оказывает существенного влияния на количественные показатели урожая, но заметно улучшает его качественные характеристики (химический состав плодов). При этом тормозится рост зеленой массы и плоды по существу полностью ассимилируют продукты фотосинтеза (например, у томатов). В других случаях (цветная капуста, турнепс) растения мало чувствительны к дефициту влаги в среднем периоде развития, но в фазе созревания нуждаются в максимальной влагообеспеченности.

Эти факторы должны учитываться при практическом использовании в первую очередь биологических оценок влагообеспеченности, когда индикатором наличия влаги служит состояние самого растения, при условии, что любой показатель, связанный с состоянием растения, существенно меняется при вариации минерального питания.

§ 1. Водный баланс растения

Рассмотрев водный баланс в системе почва—растение—воздух, можно наметить основные пути выбора приемов оценки влагообеспеченности растения.

Корневая система растения распространяется между частицами и агрегатами почвы и сосет из нее влагу, которая собирается к центральному стержню и по системе каналов стебля подается к черешкам и листьям. Можно считать, что все элементы корневой системы берут влагу из почвы. Распределение влаги между ярусами корневой системы определяется наличием доступной влаги по горизонтам почвы и оценивается по профилю влажности почвы.

В вопросах о механизме перемещения влаги от корней к листьям еще нет достаточной ясности, не выработано общее мнение о картине процесса. Рассматривается несколько возможных механизмов переноса влаги: а) положительное корневое давление, обеспечивающее нагнетание влаги в стебель; б) непрерывность нитей воды в капиллярах растения, обусловливающая перемещение влаги против гравитационного поля за счет сил сцепления при испарении с листа; в) отрицательное давление в водопроводящих стеблях, формируемое за счет подсоса вследствие испарения влаги транспирирующими органами.

Не будем рассматривать подробно экспериментальные материалы, подтверждающие или опровергающие наличие того или иного механизма переноса. Эти вопросы выходят за рамки нашей темы. Отметим только, что в последнее время преобладает мнение о преимущественном значении первых двух из упоминавшихся факторов. При этом, помимо указанных механизмов, существенную роль в транспорте влаги играют осмотические явления, а по некоторым данным и активное поглощение влаги растительными клетками. Более подробно с анализом механизмов перемещения влаги по растению можно ознакомиться в работе Т. Козловского [17].

Лист является практически единственным элементом растения, расходующим влагу, причем основной расход ее идет за счет транспирации (испарения с листьев) через устьичный аппарат листа. В простейшей модели лист может рассматриваться как испаряющая поверхность (воды) в сочетании с диафрагмой переменного сечения (устьицем), регулирующей сопротивление перехода влаги в воздух за счет изменения площади отверстия, через

которое осуществляется активное испарение. В этом случае предполагается, что в пространстве между диафрагмой и испаряющей поверхностью поддерживаются условия насыщения воздуха водяным паром при температуре листа. Такая модель достаточно точна, так как фактически кутикулярная транспирация через плотные покровные ткани листа составляет незначительную долю устьичной (обычно не более 10—15%). Исключением являются очень молодые листья, у которых кутикулярная транспирация достигает 50% общей потери воды.

Поток влаги в любом сечении растения при отсутствии накопления влаги в тканях и постоянстве транспирации должен быть постоянным. Если пользоваться аналогией с пассивными гидравлическими цепями, то поток воды в растении

$$П = \frac{H_к}{P_к} = \frac{H_с}{P_с} = \frac{H_л}{P_л}, \qquad (1.1)$$

где H — сила, вызывающая перемещение воды, P — эквивалент гидравлического сопротивления системы. Индексы «к», «с», «л» относятся к корневой системе, стеблю и листьям соответственно.

По принятой терминологии, сила, вызывающая перемещение воды, оценивается по разности дефицитов диффузионного давления на границах участков влагопроводящего тракта растения. Термин этот был введен исходя из представлений о диффузионном давлении как свойстве вещества, определяющем его диффузию при отсутствии препятствующих факторов. Дефицит диффузионного давления по смыслу близок к используемому при исследовании почвенной влаги параметру — полному потенциалу влаги. Чаще всего дефицит диффузионного давления измеряется в единицах давления. В отечественной литературе больше распространен термин «сосущая сила», очень близкий к разности дефицитов диффузионного давления.

Для растительных клеток дефицит диффузионного давления $Д$ определяется как осмотическим потенциалом $ОП$ раствора, так и гидростатическим давлением оболочки клетки, которое может интерпретироваться как тургорное давление $ТД$, обусловливающее упругость растительных тканей

$$Д = ОП - ТД. \qquad (1.2)$$

При использовании более универсальных термодинамических понятий и терминов вместо дефицита диффузионного давления говорят о потенциале влаги $\Delta\mu_w$, который складывается из капиллярной составляющей, гидростатической составляющей (за счет тургорного давления) и составляющей, обусловленной осмотическим давлением. Применительно к растительной системе потенциал влаги может рассматриваться как работа, необходимая для извлечения воды из элементов системы. Этот вопрос подробнее будет рассмотрен в главе II. В литературе, посвя-

щенной проблеме перемещения влаги в растении, обычно применяется термин «дефицит диффузионного давления».

Анализ процессов влагопереноса с привлечением наглядных понятий дефицита диффузионного давления или потенциала влаги позволяет применить единую систему для описания перемещения влаги не только в пределах растения, но и на границах с окружающей средой и в самой среде. Так, например, к системе уравнений (I.1) могут быть добавлены соотношения, характеризующие перенос влаги в почве и приземном воздухе:

$$П = \frac{H_п}{P_п} = \frac{\Delta e/\Delta x}{P_{возд}}. \qquad (I.1а)$$

Здесь $\Delta e = e_л - e$ — разность между упругостью пара внутри устьиц $e_л$ и в воздухе над растением e, Δx — толщина переходного слоя, а $P_{возд}$ — сопротивление перехода, величина, обратно пропорциональная коэффициенту обмена в атмосфере. Аналогично для почвы: $H_п$ — разность потенциалов влаги на поверхности корня и в почве, а $P_п$ — сопротивление перехода влаги от почвы в корень.

Система (I.1) справедлива для случая стационарного потока при условии, что влагосодержание отдельных ее элементов не изменяется в процессе опыта.

Строгая теория транспорта влаги в растении еще не разработана. Различные исследователи строили анализ процессов, основываясь на полуэмпирических зависимостях, типичным примером которых является расчет, выполненный А. И. Будаговским [5].

Вследствие сложности учета индивидуальных характеристик элементов растения расчет производится по эквивалентной схеме, в которой осуществлено осреднение характеристик способом приведения их к единице площади посева. Рассматривается фиктивное растение с одним листом, площадь которого равна единице площади посева, одним стеблем и одним корнем, характеристики которого определяются исходя из площади листа и реальных соотношений между этими элементами в растении.

Рассматривая поток воды в подобной идеализированной системе, можно записать расход воды через растение $Q_в$ в форме уравнения, аналогичного (I.1):

$$Q_в = \frac{\varepsilon}{g} \frac{\partial F_c}{\partial z}; \qquad (I.3)$$

здесь ε — коэффициент влагопроводности элемента системы, $\frac{\partial F_c}{\partial z}$ — градиент сосущей силы, вызывающей перемещение влаги, g — ускорение силы тяжести.

В сочетании с уравнением неразрывности потока

$$\frac{\partial Q_в}{\partial z} = \rho_ж \frac{\partial V}{\partial t} \qquad (I.4)$$

(V — объемное содержание влаги в тканях растения, см³ воды/см³ ткани, $\rho_ж$ — плотность жидкости, г/см³) и соотношением, определяющим сосущую силу по (I.2), можно получить для стационарного случая $\left(\frac{\partial Q_в}{\partial t} = 0\right)$ уравнение, связывающее сосущую силу листа $F_{сл}$ с параметрами почвы и растения:

$$F_{сл} = \frac{Q_в}{\gamma_j} + \frac{F_{oo}}{\left[\frac{1}{\xi}\left(W - \frac{Q_в}{K_п}\right) + 1\right]^3}, \qquad (I.5)$$

здесь $K_п$ — эквивалентный коэффициент переноса влаги от почвы к корню, W — влажность почвы, ξ — коэффициент, характеризующий давление почвенной влаги, F_{oo} — осмотическое давление клеточного раствора при минимальном объеме клетки (минимальном влагосодержании), η — интегральный коэффициент, характеризующий общее сопротивление перемещению влаги всего тракта растения от корня до листа.

Как отмечалось выше, лист можно рассматривать как двухслойную систему (испаряющая поверхность + регулирующая сетка устьичных клеток), в которой на испаряющей поверхности имеет место насыщение при температуре поверхности. Комбинируя уравнение переноса пара в такой системе с уравнением теплового баланса, можно получить транспирационный поток пара $E_т$:

$$E_т = \frac{1}{1 + b_3/D_л}(b_1 D_a d + b_2 R), \qquad (I.6)$$

где b_1 и b_2 — коэффициенты, связанные с физическими константами воздуха (плотностью $\rho_в$ и объемной теплоемкостью $c_{p_в}$) и производной от насыщающей влажности φ'; b_3 — коэффициент, зависящий от $c_{p_в}$, φ' и D_a (D_a — коэффициент, связанный со скоростью обмена в приземном воздухе); d — дефицит насыщения водяным паром приземного воздуха; R — радиационный баланс; $D_л$ — коэффициент, характеризующий скорость обмена между поверхностью испаряющих клеток листа и поверхностью листа. Если принять, что пар от испаряющих элементов к поверхности листа транспирируется по законам молекулярной диффузии, то можно оценить вероятные пределы изменения $D_л$.

Эта модель не учитывает кутикулярную транспирацию, не связанную с устьичным аппаратом листа. Принимая в расчет возможные механизмы управления устьичным аппаратом, величину транспирации можно связать с сосущей силой листа или тургорным давлением и далее по (I.5) непосредственно с влажностью почвы.

При видимой простоте такой расчет не может дать исчерпывающего описания процессов транспорта влаги, так как многие допущения сформулированы упрощенно, без учета реальных процессов в органах растения; кроме того, часть параметров (например, коэффициенты D_a, $D_л$) задается в виде неявных функций.

Уравнения (I.5) и (I.6) не решаются в общем виде. Численные примеры позволяют оценивать лишь взаимосвязь влажности почвы, характеристик приземного слоя атмосферы и величины транспирации.

При перемещении воды из почвы в растение и далее в воздух в некоторых звеньях цепи могут возникать условия ограничения потока. Это может быть при малой влажности почвы, когда сосущая сила корневых волосков станет недостаточной для переноса влаги в корень растения, или при интенсивном испарении с поверхности листа, когда влагопроводность сосудистой системы растения не может обеспечить передачи необходимого количества влаги и т. п.

Растение обладает способностью регулировать свой водный режим, и в случае возникновения ограничений для потока влаги одновременно осуществляется частичная коррекция: растут гра-

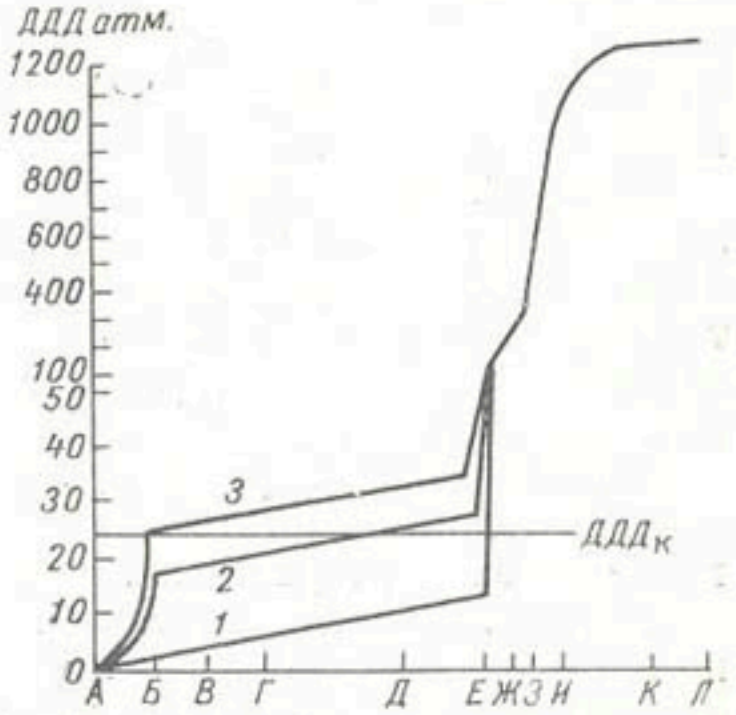


Рис. 1. Изменение потенциала влаги в системе почва—растение—воздух.

1 — полная влагообеспеченность, *2* — временное завядание, *3* — устойчивое завядание; *А* — почва, *Б* — поверхность корневых волосков, *В* — кора, *Г* — эндодерма, *Д* — листовые жилки, *Е* — клетки мезофилла, *ЕЖ* — межклеточное пространство, *ЖЗ* — щель устьица, *ЗИ* — ламинарный подслой, *ИК* — турбулентный пограничный слой воздуха, *КЛ* — свободная атмосфера.

диенты потенциалов влаги, изменяются коэффициенты влагопроводности (последнее проявляется в основном через регуляторные функции устьичного аппарата). Организм растения как бы стремится стабилизировать поток влаги в новых условиях и компенсировать возникшие изменения установившегося режима.

Схема распределения потенциалов влаги в системе предложена Дж. Филипом для стационарных условий. На рис. 1 приведены три случая, отражающие различную степень влагообеспеченности. При высокой влажности и соответственно малой энергии связи влаги в почве изменения дефицита диффузионного давления *ДДД* в корневой системе незначительны. В случае понижения влажности почвы необходимый приток влаги обеспечивается за счет существенного повышения дефицита диффузионного давления корней. Перепад потенциала влаги на проводящих каналах растения от корней до испаряющих элементов практически не зависит от влагосодержания почвы, но по мере иссушения почвы возникает ситуация, когда в зоне листа дефицит диффузионного давления превышает критическое значение, при котором начинается снижение

тургора. При некотором значении влажности почвы (кривая *2*) у растений наблюдается временное завядание. При более сухой почве (кривая *3*) критическое значение дефицита диффузионного давления может наблюдаться непосредственно на элементах корневой системы. В таких условиях растение переходит в состояние устойчивого завядания.

Аналогичный анализ может быть проведен и для других условий влагообмена листа с атмосферой.

Как видно из рис. 1, в тракте переноса влаги по растению имеются два узла (почва — корень и лист — воздух), создающие основное сопротивление потоку. Этим узлам соответствуют наибольшие перепады потенциала влаги. По ходу потока влаги первым «критическим» звеном является переход почва — корень. Уменьшение влагопроводности почвы может вызвать непропорционально большое ослабление потока влаги в этом звене, так как за счет уменьшения тургорного давления воспринимающие влагу элементы корневой системы теряют упругость и возможность перемещаться в почвенных каналах.

Как правило, наиболее чувствительным элементом тракта является лист, так как в нем в первую очередь наступает критический дефицит диффузионного давления. Поэтому даже относительно небольшие изменения условий обмена могут вызвать заметное уменьшение тургорного давления с последующим частичным закрыванием устьиц и уменьшением транспирации.

Таким образом, рассматривая цепь перемещения влаги в растении, можно наметить основные точки, удобные для оценки влагообеспеченности растений.

Помимо общих показателей физиологического состояния растений, таких, как интенсивность фотосинтеза, рост растения, объем зеленой массы, оценка его влагообеспеченности может быть сделана по любому из элементов тракта переноса влаги. Если при этом иметь в виду, что сопротивление отдельных элементов практически невозможно оценить, измерения целесообразно производить либо по значению потока влаги в выбранном сечении, либо по значению потенциала влаги. Измерения суммарного потока удобно осуществлять по величине скорости течения сока в основном стебле либо по значению транспирации (потоку пара над листом). В качестве параметров, связанных с дефицитом диффузионного давления, используют сосущую силу листа или концентрацию клеточного сока, а также величину тургорного давления (упругость растительных тканей). Для этой цели можно применять и такой параметр, как показатель степени раскрытия устьиц.

При употреблении физиологических показателей состояния растения для оценок его влагообеспеченности необходимо учитывать суточный ход изменений почти всех таких показателей. Кроме того, следует иметь в виду неоднозначность физиологических оценок. Угнетение жизнедеятельности растений может проявляться и при дефицитах минерального питания, и при избыточном увлаж-

нении почвы. По некоторым данным, в анаэробных условиях в почве (практически при избыточном поливе, в опыте — при продувке почвы углекислотой) даже при наличии доступной влаги и избытке минерального питания наблюдаются явления угнетения растений (задержка ростовых процессов, уменьшение поглощения влаги из почвы, снижение транспирации и т. п.). На разные растения угнетающие факторы действуют по-разному, хотя общий характер реакции сохраняется, но количественные соотношения зависят от типа травостоя, развития лиственного покрова, фазы вегетации и возраста растений.

§ 2. Транспирация и температура листа

Транспирация представляет собой в основном процесс испарения воды с поверхности листьев. Для интересующего нас аспекта проблемы транспирации не существен тонкий анализ физиологических процессов в листе или сложных регуляторных механизмов растения. В данном случае достаточно отметить основные характеристики транспирации.

При исследовании зависимости транспирации от внешних воздействий получают уравнения регрессии вида

$$y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_3 + \ldots \qquad (1.7)$$

Наиболее существенными параметрами (x_1, x_2, x_3) являются влажность почвы, метеорологические показатели, а также фактор времени.

Хотя связь транспирации с влажностью почвы очевидна, при рассмотрении количественных соотношений были выявлены некоторые особенности этой зависимости. Регуляторные механизмы растения способны поддерживать уровень транспирации с небольшими отклонениями от нормы при весьма больших изменениях влагосодержания почвы. Имеются данные, указывающие на то, что в некоторых случаях транспирация практически не зависит от влажности почвы вплоть до достижения условий устойчивого завядания, при котором должно прекратиться поступление воды в растение.

Исследования показали также, что даже при достижении влажности устойчивого завядания поглощение воды из почвы не прекращается. Иногда оно наблюдается и после гибели растения (сосудистая система растения работает как испаряющий фитиль). Следует отметить, что результаты экспериментов такого рода недостаточно надежны и достоверны, так как в лабораторных опытах потребность во влаге часто занижена и транспирация может обеспечиваться за счет потенциальной энергии системы почва — корень вплоть до влажности завядания. В полевых опытах трудно учесть долю различных ярусов корневой системы в обеспечении растений влагой, поэтому оценка условий в почве при осреднении

влажности не всегда соответствует истинному положению, при котором тургор может обеспечиваться работой малой части корневой системы, расположенной в зоне достаточно увлажненной почвы.

Среди метеорологических параметров наиболее сильное влияние на транспирацию оказывает дефицит влажности воздуха, отражающий потенциальную способность среды к поглощению влаги. Из других существенных метеорологических факторов отметим скорость ветра, определяющую значение коэффициента обмена в среде, а также интенсивность радиации.

Более подробно взаимосвязь этих параметров будет рассматриваться в главе III при анализе процессов распределения энергии для поля в целом. Характер подобных зависимостей применительно к транспирации может быть иллюстрирован рис. 2, на котором приведены относительные изменения транспирации в зависимости от влажности почвы и освещенности.

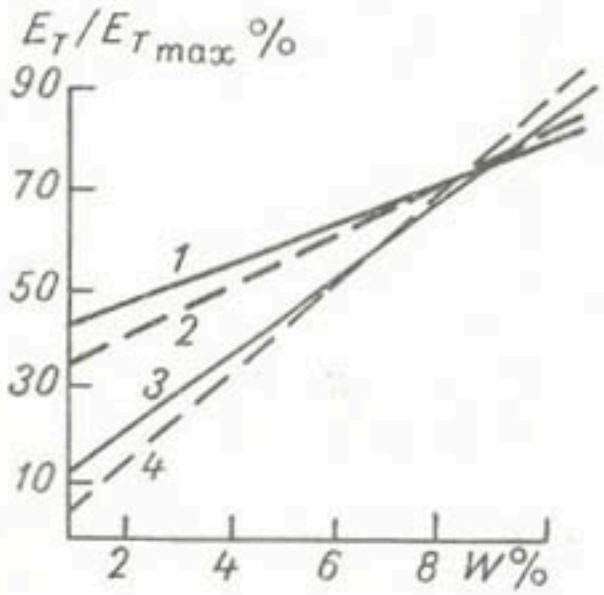


Рис. 2. Зависимость транспирации E_T от влажности почвы W ($E_{T_{max}}$ — максимальная транспирация).

Дуб и сосна соответственно: *1, 3* — при ярком освещении, *2, 4* — при слабом освещении.

Среди прочих метеопараметров, влияющих на величину транспирации, необходимо отметить температуру воздуха и почвы. Помимо прямого воздействия на дефицит влажности воздуха, температура влияет на интенсивность процессов обмена в листе и на работу устьичного аппарата, управляющего транспирацией. В некоторой степени аналогично влияет и температура почвы. В этом случае существенно не только ослабление физиологических процессов в корневой системе при уменьшении температуры, но и одновременное уменьшение скорости поступления влаги из почвы к корневой системе растения. Влияние температуры почвы в данном случае может быть сведено к эквивалентному изменению количества доступной влаги в почве.

В корреляционной зависимости транспирации от внешних факторов особое место занимает фактор времени, определяющий изменения этого параметра в ходе развития растения и под действием периодических изменений метеорологических параметров. В первую очередь это проявляется в суточном ходе транспирации. В темное время суток транспирация обычно очень мала. При осве-

щении начинается относительно быстрый рост выделения влаги. В течение светлого времени суток изменения транспирации незначительны, но в полуденные часы за счет частичного закрывания устьиц при временном дефиците влаги часто может наблюдаться уменьшение транспирации.

В аридной зоне при высокой интенсивности солнечного излучения, большом дефиците влажности воздуха и достаточном увлажнении почвы возможны случаи дневной инверсии температуры (оазисный эффект), сопровождающейся значительным увеличением поступления тепла к деятельной поверхности за счет потока из воздуха. Интенсивная транспирация в этих условиях может вызвать временное обезвоживание листьев, так как подводящая сосудистая система растения не способна обеспечить необходимый приток влаги даже при росте сосущей силы листа. Такой времен-

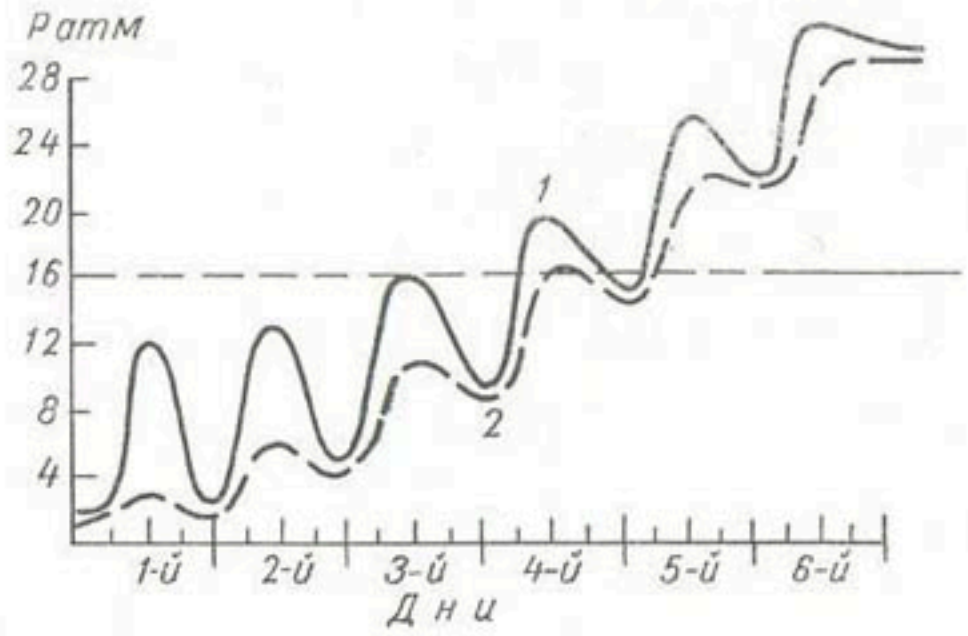


Рис. 3. Изменения потенциала влаги в растении (*1*) и в почве (*2*) при ограниченных запасах влаги.

ный дефицит влаги в листе в зависимости от условий роста иногда вызывает заметное снижение тургорного давления и временное привядание листьев, сопровождающееся снижением транспирации. Если почва достаточно увлажнена, такие периоды кратковременны, тогда при уменьшении притока тепла к листьям (снижение радиационного баланса) дефицит влаги в листьях ликвидируется и остаточный дефицит не возникает. Остаточные явления появляются только при недостаточном увлажнении почвы, когда перекачка влаги в периоды малой транспирации уже не может компенсировать потери ее при освещении. Хронический дефицит прогрессивно увеличивается и сопровождается ослаблением ростовых процессов вплоть до полного завядания растений.

Развитие устойчивого завядания может быть в данном случае иллюстрировано рис. 3, где показано изменение дефицита диффузионного давления в растении в зависимости от потенциала влаги в почве в зоне корней. Отмеченное на графике давление 16 атм. соответствует критическому уровню, при котором начинается

снижение тургорного давления и ослабление транспирации. Устойчивое завядание при резком уменьшении транспирации наблюдается при условиях, когда потенциал почвенной влаги больше критического уровня. В переходный период (3-и и 4-е сутки) наблюдается частичное завядание растений в дневное время. При этом дефицит диффузионного давления лишь незначительную часть суток превышает критический уровень.

В зависимости от характера растительного покрова и микроклиматических особенностей возможны отклонения суточного хода транспирации от типичных зависимостей. Помимо полуденного минимума, встречаются варианты характеристик с медленным ростом и максимумом транспирации перед заходом солнца.

Как правило, суточные колебания не принимаются во внимание при рассмотрении уравнений типа (I.7), для которых определяются суточные суммы транспирации или ее значения за более длительный период. Учитываемые временные зависимости в уравнении (I.7) имеют в виду более медленные изменения транспирации и задаются временным ходом x_1, x_2, x_3.

Помимо суточных колебаний, четко прослеживаются сезонные изменения транспирации. Они обусловливаются не только ходом притока энергии от солнца, но и изменениями интенсивности физиологических процессов в растении по мере роста и старения его органов. Именно этот фактор и учитывается в основном как фактор времени. Как правило, максимум транспирации при полной влагообеспеченности наблюдается в период наибольшей активности растительного покрова в середине лета.

Показатели физиологической активности обычно связаны с фазами развития растений и заметно изменяются только при переходе от одной фазы к другой. Коэффициенты связи между транспирацией и фактором времени могут меняться при изменении условий минерального питания или элементов агротехники.

Абсолютное значение транспирационного потока влаги не может быть показателем состояния растений в полевых условиях, так как в большой мере обусловливается метеорологическими условиями и индивидуальными особенностями растений. Для диагностики состояния растений более удобны относительные характеристики, правильным выбором которых можно исключить побочные сильнодействующие факторы. Так, например, применяется относительная интенсивность транспирации, определяемая в долях максимально возможной. Часто используются параметры типа удельной транспирации, приведенной к единице площади листа или единице объема зеленой массы. При оценках влагообеспеченности растений наиболее удобно применять значение транспирации, нормированное по величине транспирации при оптимальной влагообеспеченности. Подобным параметром можно пользоваться, например, при выращивании растений в тщательно контролируемых условиях. Другая возможность определения влагообеспечен-

ности — оценка состояния растений по комплексным показателям, связывающим интенсивность транспирации с каким-либо из параметров фотосинтеза.

Для сравнения различных видов растений по потребности во влаге обычно используются транспирационные коэффициенты, отражающие количество влаги, расходуемое при образовании 1 г сухого вещества зеленой массы. Значение транспирационного коэффициента (в граммах на 1 г) позволяет определить показатели эффективности использования влаги различными растениями. Типичные значения транспирационных коэффициентов некоторых культур приведены в табл. 1 [17, 19, 20, 24].

Таблица 1

Транспирационные коэффициенты сельскохозяйственных культур

Люцерна	Кормовой горох	Овес	Хлопок	Ячмень	Пшеница	Кукуруза	Просо	Сорго
858	578	635	562	521	505	372	287	271

Эффективность использования влаги по отношению к количеству полезного продукта растительного покрова более полно характеризуется коэффициентом водопотребления, соответствующим количеству воды, расходуемому на создание 1 т урожая (в м^3 на 1 г).

Коэффициент водопотребления связан с транспирационным коэффициентом, но если последний можно использовать для расчетов за любой заданный интервал вегетационного периода, то оценивать по коэффициенту водопотребления можно только после снятия и обработки урожая. Вместе с тем с точки зрения конечного эффекта использования влаги более показателен коэффициент водопотребления.

Таблица 2

Коэффициенты водопотребления сельскохозяйственных культур

Пшеница	Кукуруза	Картофель	Сахарная свекла
1350	790	360	1450

Возможности практического применения указанных коэффициентов для управления поливом ограничиваются также наличием трудно учитываемых зависимостей их от внешних факторов (питания, метеорологической обстановки и т. п.).

К выбору критериев влагообеспеченности растений по транспирационным показателям необходимо подходить осторожно, имея в виду реальные корреляционные соотношения между объемом зеленой массы и выходом конечного продукта. Кроме того, следует учитывать, что когда вода является лимитирующим фактором, транспирация обусловливается метеорологическими факторами,

в то время как прирост растений с точки зрения ассимиляции (накопления сухого вещества или урожая) ограничен способностью фотосинтетических активных тканей к поглощению энергии света. При значительном увеличении интенсивности света прекращается рост фотосинтеза и избыток энергии расходуется на испарение. За счет этого температура листа поддерживается в пределах нормы.

При ограничении притока влаги по сравнению с необходимым количеством одновременно с уменьшением транспирации относительно оптимальной нормы начинает расти температура листа. В связи с этим предлагалось использовать температуру органов растения как критерий его влагообеспеченности.

Измерения показали, что температура листа зависит от его размещения по ярусам и растет с возрастом листа, что свидетельствует об ослаблении транспирации по мере старения ткани. По данным измерений, даже при полной влагообеспеченности растения температура листа значительно превышает температуру смоченного термометра психрометра. Это указывает не только на наличие радиационного нагрева, но и на ограничение скорости притока влаги к листу.

Многолетние данные указывают на высокую степень корреляции между разностью температуры лист — воздух и влажностью почвы (коэффициент корреляции 0,63—0,88), сосущей силой листа (коэффициент корреляции 0,72—0,87), концентрацией клеточного сока (коэффициент корреляции 0,79—0,88) и т. д. Из метеорологических факторов наиболее сильные связи с температурой листа наблюдаются для интенсивности радиации, влажности воздуха и скорости ветра.

§ 3. Измерение транспирации и температуры листьев

Принципиально возможны и практически используются две группы методов определения любых биологических показателей: разрушающие и неразрушающие. В первом случае растение в целом или его элементы, на которых производится измерение, разделяются и частично или полностью уничтожаются. Эти методы реализуются на срезанных растениях (или листьях, побегах). Они наиболее просты, давно применяются и относительно широко распространены.

Методы второй группы, как правило, связаны с применением специальной и довольно сложной аппаратуры и вошли в практику исследований в последнее время. Это касается как определения транспирации, так и других биологических характеристик влагообеспеченности.

Оценка транспирации может быть осуществлена:

а) при взвешивании растения или его элементов в условиях нормальной транспирации;

б) при измерении потока водяного пара методами изоляции объекта или по потоку водяного пара вблизи листа, определяемому через градиент упругости пара между средой и листом. В последнем случае необходимо независимое определение коэффициента обмена, а сам метод аналогичен рассмотренному ниже методу турбулентной диффузии (глава III);

в) при измерении температуры листа или перепада температуры между листом и средой.

С каждым из этих путей измерения связаны определенные трудности и недостатки как принципиального, так и прикладного характера.

Наиболее распространен метод взвешивания, который может быть реализован в вариантах разрушающих [13] или не разрушающих [12] растение. Он основывается на предположении о том, что растение в целом или его часть, лишенные нормального притока влаги, способны в течение некоторого отрезка времени сохранять нормальный режим транспирации за счет расходования внутренних запасов влаги. Определяя уменьшение веса системы за достаточно малый промежуток времени, можно (с некоторой ошибкой) отнести эти изменения за счет выделения влаги в процессе транспирации. Естественно, что, чем больший интервал времени допустим, тем больше точность измерений, так как вес удаленной влаги определяется как малая разность больших значений веса растения в моменты взвешивания.

При взвешивании срезанных растений или их частей временные соотношения задаются жестко, так как из опытных данных известно, что через 5—8 минут после отделения от корней у некоторых растений может наблюдаться ослабление транспирации за счет уменьшения тургора при обезвоживании тканей. Для исключения вытекания сока срез обычно парафинируют непосредственно при отделении корневой системы.

Для сокращения процесса взвешивания срезанных элементов растения все операции необходимо осуществлять непосредственно в поле. В этих условиях весьма затруднительно обеспечить необходимую точность взвешивания.

При использовании весовых методов определения транспирации на неповрежденных растениях в вегетационных сосудах или испарителях существенно возрастают требования к точности взвешивания, так как абсолютный вес объекта значительно увеличивается. Но одновременно возможно увеличение интервала времени между взвешиваниями, так как влагоемкость системы при наличии почвы достаточно велика и уменьшение тургора существенно не проявляется. В случае же значительного увеличения временного интервала могут начать сказываться факторы накопления массы за счет естественного хода фотосинтеза, но, как правило, эта погрешность очень мала и ею справедливо пренебрегают.

Определяя транспирацию для растений в почвенных испарителях или вегетационных сосудах, необходимо применять меры

для исключения испарения непосредственно с поверхности почвы.

С учетом всех сложностей и погрешностей можно утверждать, что метод взвешивания вегетационного сосуда, пожалуй, единственный абсолютный метод определения транспирации. Систематическая погрешность метода, принципиально некомпенсируемая, связана с тем, что в реальных полевых условиях сомкнутого травостоя транспирация сообщества заметно ослаблена по сравнению с отдельным растением. Это обусловливается экранировкой нижних ярусов листьев и уменьшением коэффициента обмена внутри травостоя по сравнению с условиями для отдельно взятого растения. Рост влажности воздуха внутри травостоя также приводит к снижению транспирации. Соблюдение этих условий позволяет производить измерения транспирации указанным методом на живом растении как в вегетационном сосуде, так и в реальных условиях сомкнутого травостоя в поле.

В Агрофизическом институте В. Г. Кармановым и его сотрудниками разработана группа датчиков [29] для исследований на растениях без нарушения состояния объекта (микрогигрометр и серия микротермометров для измерения температуры органов растения и перепада температуры между растением и средой). Основой этих датчиков являются полупроводниковые микротермосопротивления, технология изготовления и сортировки которых позволяет существенно повысить надежность и точность измерений температуры, а на этой основе и других параметров, функционально связанных с изменениями температуры (влажности воздуха, скорости потока воздуха или жидкости и т. п.).

Если невозможна реализация полного объема измерений (например, измерений коэффициента обмена), то относительные изменения интенсивности транспирации могут быть определены по изменению упругости паров воды вблизи листа или перепада влажности воздуха между листом и средой. Этот метод получил признание в практике исследований. Из известных влагомеров, применяемых для определения динамики транспирации, обычно используют сорбционные электрогигрометры, специально разрабатываемые для этой цели в вариантах миниатюрных облегченных конструкций [14].

В датчиках электромикрогигрометров используется зависимость электрического сопротивления слоя сорбента (или концентрации раствора соли на поверхности датчика) от влагосодержания газовой среды, находящейся в равновесии с сорбентом.

Сказанное выше относится к случаю возможной экстраполяции измерений транспирации в вегетационных сосудах на условия полевого эксперимента. Применение почвенных испарителей для определения транспирации в полевых условиях позволяет несколько уменьшить ошибки.

Как известно, почвенный испаритель представляет собой изолированный монолит почвы с естественным растительным покро-

вом. В обычных вариантах конструкций почвенные испарители обеспечивают измерение суммарного испарения. Для определения транспирации с помощью почвенного испарителя необходимо исключить физическое испарение с поверхности почвы, что достигается, в частности, применением поверхностных пленочных экранов. Такой вариант использования испарителя возможен только для ограниченного числа видов растений.

Применяется и другая схема использования почвенных испарителей для определения транспирации. При ее реализации на поле устанавливаются два одинаковых испарителя. В одном из них помещается монолит почвы с нормальной растительностью, а во втором растения срезаны под корень. Для сохранения нормальных условий инсоляции и обмена в припочвенном слое срезанные растения подвязываются над площадкой испарителя, который в этом случае обеспечивает определение испарения непосредственно с почвы. Величина транспирации вычисляется как разность между суммарным испарением по данным первого испарителя и испарением с почвы по данным второго испарителя.

Принципы конструктивных решений почвенных испарителей и вопросы методики их применения будут рассмотрены несколько подробнее в главе II.

При определении транспирации весовым методом для срезанных побегов, помимо отмеченных погрешностей, связанных с выбором интервала времени между взвешиваниями, весьма существенны ошибки, обусловленные отделением элемента от системы. Помимо внутренних физиологических изменений во времени, на точность измерений влияют и другие факторы, такие, как изменения в естественном наклоне и расположении листьев относительно естественной ярусности, увеличение коэффициента обмена; изменение температуры и влажности среды, радиационных условий; возможное дополнительное охлаждение органов растения за счет тепловых контактов с аппаратурой для взвешивания и т. п. Полная коррекция погрешности в данном случае нереальна, и остаточная ошибка всегда оказывается значительной, так как принципиально невозможно сохранить условия естественного травостоя. При этом достоверность результатов может быть обеспечена только при учете указанных факторов и правильной организации измерений.

При реализации весовых методов определения транспирации в полевых условиях применяется обычная весовая аппаратура. Как всегда, некоторое снижение случайных погрешностей может быть достигнуто при увеличении числа повторностей для проб.

Другой вариант прямого измерения транспирации предусматривает изоляцию растения в целом или части растения в специальной камере и анализ воздуха, пропускаемого через камеру [22]. Подобные камеры обычно изготавливаются из прозрачной пластмассы и устанавливаются на штативе. Эластичное уплотнение обеспечивает прохождение стебля в камеру при минимальной

утечке воздуха. Камера снабжена вентилятором, который может создать необходимые изменения коэффициента обмена для растения.

Для таких установок наиболее сложна проблема создания в камере нормальных условий, которые могут быть обеспечены лишь при большой кратности обмена воздуха. Необходимые нормы обмена подлежат определению. Максимально возможное приближение к нормальным условиям достигается при равенстве температуры листа в камере и вне ее, а также при равенстве влажности воздуха на выходе камеры значению этого параметра во внешней среде. Температура листа и влажность воздуха взаимосвязаны и могут регулироваться при соответствующем выборе скорости вращения вентилятора. В качестве индикаторов влажности воздуха и температуры листа в подобных установках обычно применяются специальные датчики, которые будут рассмотрены ниже. Значение транспирации определяется по известному количеству проходящего воздуха и изменению его объемного влагосодержания.

В одной из модификаций метода изоляции растения для определения количества влаги использован инфракрасный гигрометр. Он применялся как индикатор изменения влажности воздуха в камере постоянного объема. Транспирация растения рассчитывалась по времени, необходимому для изменения влажности воздуха в камере между двумя фиксированными значениями этой влажности.

Применение инфракрасного гигрометра позволяет создать точную аппаратуру с высокой чувствительностью по концентрации пара при малом времени, необходимом для измерений.

Суммарная транспирация растений, выращиваемых в вегетационных сосудах, может определяться непрерывно в процессе опыта с помощью самобалансирующихся весов. Типичный пример подобного устройства представляет установка, разработанная сотрудниками Агрофизического института на базе весов ВНЦ-500 [12].

В установке применена автоматическая регистрация разбаланса весов с помощью фотоэлектрического индикатора. Для этого на стрелке закреплена маска, через щель которой освещается дифференциальный фотоэлемент. Сигнал с фотоэлемента фиксируется на потенциометре ЭПП-09. При достижении максимально-допустимого разбаланса весов, соответствующего концу шкалы потенциометра, одновременно с фотоэлементом освещается второй фотодатчик, запускающий через реле механизм дозатора. Дозатор опускает на весы калиброванный разновес, возвращающий систему в начальное положение.

Подобные конструкции самобалансирующихся весов применяются давно и достаточно широко распространены в практике специальных исследований. Разница между моделями таких весов обычно в узле регистрации разбаланса (фотоэлектрическая, электромагнитная и т. п.), а также в деталях устройства дозатора. За-

пись величины транспирации при линейной градуировке прибора имеет вид пилообразной кривой.

В методе определения транспирации по потоку влаги, протекающему между листом и средой, основную принципиальную трудность составляет определение коэффициента обмена в зоне листа. Это связано с малым объемом исследуемой зоны и подвижностью объекта. Во избежание нарушения естественных условий лист нельзя экранировать от излучения и механически нагружать. Последнее вызывает дополнительные трудности не только при определении коэффициента обмена, но и при измерении влажности воздуха в зоне листа. Датчик влажности воздуха должен быть достаточно малым по размерам и весу, чтобы не вносить искажения в исследуемую среду и тем самым обеспечивать надежное измерение транспирации при нормальных условиях. Расстояние от датчика до листа также должно быть по возможности малым.

Наиболее распространены микрогигрометры электролитического типа, в которых измеряется сопротивление поверхностной пленки (или объемного элемента, насыщенного электролитом). По характеристикам насыщения для гигрометрии наиболее удобен раствор хлористого лития, который и используется в большинстве известных приборов подобного типа. Стабилизация и коррекция градуировочных характеристик в чувствительных элементах гигрометров достигается путем применения смеси солей на основе хлористого лития. Возможные ошибки измерений за счет поляризации электролитов обычно исключаются при использовании измерительных схем переменного тока.

Общим недостатком электролитических гигрометров являются необратимые изменения их характеристик при загрязнении или переувлажнении. Последнее связано с тем, что длительная работа датчика вблизи точки насыщения или при выпадении росы может привести к стеканию части раствора и последующему сдвигу характеристики. Весьма существенна также температурная погрешность электролитических датчиков. Все эти недостатки серьезно ограничивают возможности использования электролитических гигрометров при точных измерениях влажности, но, как правило, не мешают применению их для определения относительных изменений транспирации по влажности воздуха непосредственно вблизи поверхности листа.

Некоторые модели микрогигрометров основаны на принципе термоэлектролитических измерителей влажности газа. В них динамика влажности определяется по температуре подогреваемого электролитического датчика. Нагрев датчика происходит за счет увеличения рабочего тока через электролит при разбавлении раствора влагой, поглощенной из воздуха. В состоянии установившегося равновесия поглощение влаги прекращается, так как давление пара в воздухе становится равным давлению пара над поверхностью электролита при измененной температуре датчика.

Важным достоинством подобных датчиков является слабая зависимость показаний от температуры среды.

В показывающих и регистрирующих микрогигрометрах применяются обычные схемы измерения сопротивления: в электролитических — схема омметра, в термоэлектролитических, как правило, — мостовые неравновесные схемы измерения температуры.

Помимо указанных методов определения транспирации, в литературе имеются сведения о применении других, менее распространенных способов, основанных на измерениях влажности воздуха (например, колориметрический).

Уже отмечалось, что более грубые оценки транспирации могут быть осуществлены при измерении температуры листа. Но такие

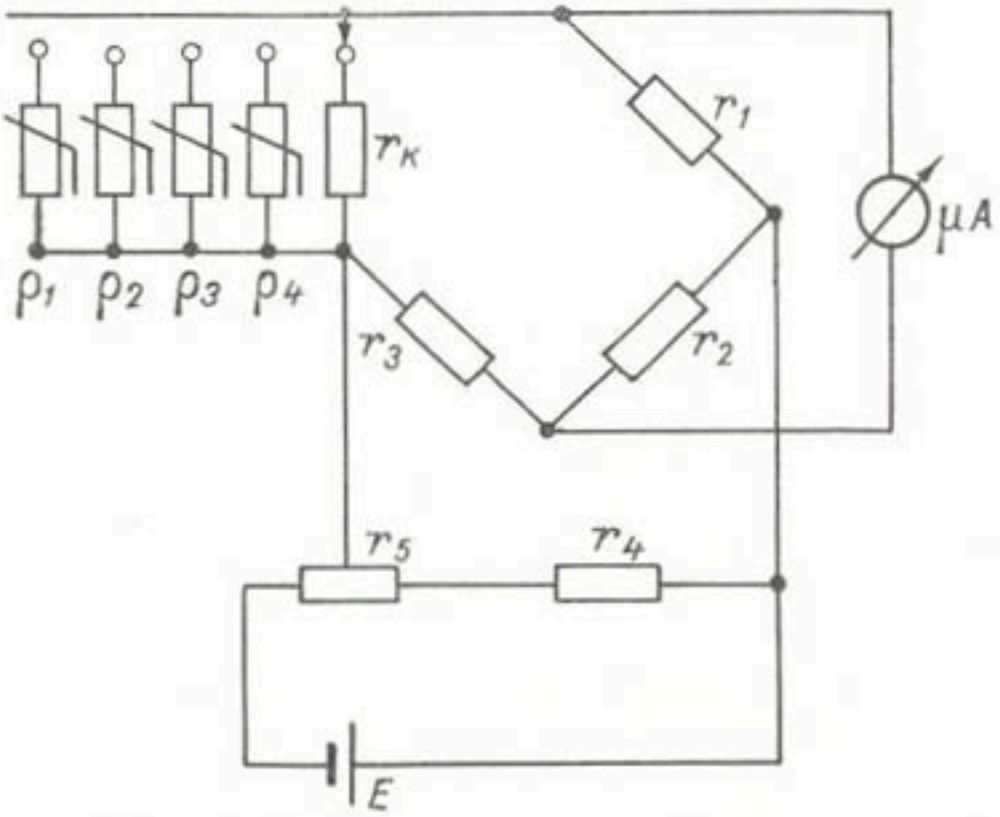


Рис. 4. Схема микроэлектротермометра.

измерения принципиально не позволяют точно количественно измерить выделение влаги растением. К конструкциям чувствительных элементов в случаях измерений температуры листа (размеры, системы установки датчиков и т. д.) предъявляются те же требования, что и к датчикам транспирации (влажности воздуха).

Преимущества измерений температуры органов растения для определения транспирации обусловлены простотой точных измерений температуры. Большие возможности в этом направлении открывают полупроводниковые микротермосопротивления. Среди специальной аппаратуры для этой цели имеются переносные микротермометры и комплексные стационарные установки для регистрации температурных условий органов растений, разработанные в АФИ.

Схема микротермометра (рис. 4) представляет собой обычный неравновесный мост. Введение коррекции напряжения питания моста непосредственно перед измерением позволяет существенно

уменьшить ошибки, связанные с нестабильностью источников питания и самого индикатора. Прибор полевой, переносный, с питанием от батареи карманного фонаря.

Комплект термометров для растения — стационарная лабораторная установка, предназначенная для измерений и автоматической регистрации температуры органов растения и перепада температуры между растением и средой. Блок-схема приведена на рис. 5. Датчики с помощью коммутатора подключаются к измерительному блоку (его основной элемент — неравновесный мост). Выходной сигнал измерителя регистрируется на электронном потенциометре (ЭПП-09 или ПС1-10), переключатель которого используется для коммутации датчиков. Измерительный блок содержит также логическую схему переключения диапазонов измерения. При достижении максимального сигнала в первом диапазоне измерительные мосты автоматически переключаются и измерение продолжается во втором диапазоне. Но при этом не следует забывать, что высокие достижения в измерении температуры листа не могут обеспечить точных определений транспирации, так как последняя величина по температуре может быть оценена только качественно.

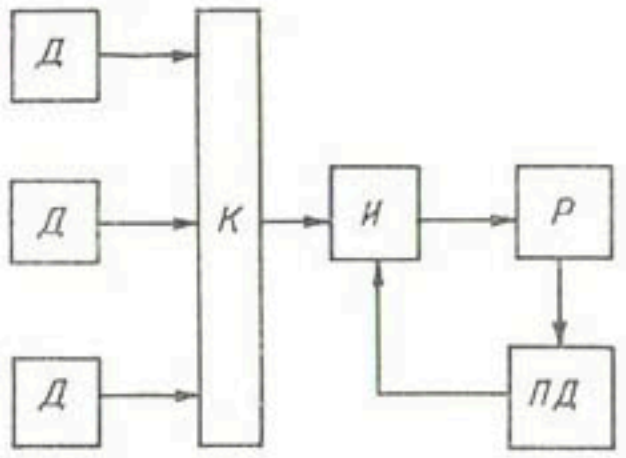


Рис. 5. Блок-схема комплекта термометров для растения.

Д — датчики, *К* — коммутатор датчиков, *И* — блок измерения, *Р* — регистратор, *ПД* — переключатель диапазонов измерения.

§ 4. Концентрация клеточного сока и сосущая сила листа

Как известно, растительные ткани содержат большое количество влаги (до 80—90%), выполняющей различные функции в процессах жизнедеятельности растений (как растворитель и переносчик солей и газов она играет большую роль в процессах фотосинтеза и гидролиза). При этом вода в растении может находиться в различных формах, характеризующихся различной энергией связи с веществом растений. Помимо легкоподвижной несвязанной влаги, располагающейся в крупных капиллярах, имеется относительно более сильно связанная влага в микрокапиллярах. Большое количество влаги удерживается в виде гидратных комплексов на гидрофильных коллоидах и белках тканей растения — эта часть влаги наиболее сильно связана и, как правило, не высвобождается для участия в процессах влагообмена.

Вода в клетках растения и межклеточном пространстве представляет собой непрерывную фазу, и любые изменения ее состояния в каком-либо участке цепи вызывают соответствующие изменения уровня энергии связи во всей системе в целом. Это в свою очередь приводит к перемещению влаги в системе. При этом представления о клеточном соке как стабильной субстанции, так же как и соотношения «свободной» и «связанной» влаги, по существу являются модельными и не должны абсолютизироваться.

Экспериментальные методы исследования жидких компонент растения, как правило, связаны с химическим или механическим разрушением тканей и потому в основном приводят к значительным сдвигам в составе полученного субстрата по сравнению с истинным составом их в живой клетке. Аналогично и при измерениях энергии связи влаги осмотическими методами количество «свободной» воды не обязательно будет соответствовать этому параметру для живого растения. Поэтому при использовании подобных параметров следует всегда обращать внимание на идентичность экспериментальных методов. Только при соблюдении такого требования получаемые данные будут сопоставимы.

Если растение поддерживает уровень транспирации в условиях недостаточного водоснабжения (независимо от того, лимитируется ли приток влаги ее недостатком в почве или высоким сопротивлением подводящих каналов), то по истечении некоторого времени нарушение водного баланса листа приведет к изменению концентрации клеточного сока. Такое изменение концентрации появляется из-за того, что, несмотря на недостаток в притоке воды, величина транспирации не меняется, поскольку площадь испарения (суммарное сечение устьичных отверстий) сохраняется достаточно большой и практически неизменной до тех пор, пока из-за уменьшения тургорного давления или других факторов не начнут закрываться устьица. Изменение концентрации клеточного сока и соответствующее изменение осмотического давления воды в листе вызывают увеличение сосущей силы и в конечном счете способствуют поступлению воды через корневую систему.

При увеличении концентрации клеточного сока, помимо роста концентрации ионов, обычно отмечаются изменения в количестве и в соотношении крахмала и сахаров в органах растений, причем направление этих изменений может быть разным. Оно зависит не только от вида растения, но и от возраста ткани и т. п.

Величина концентрации клеточного сока и связанное с ней значение сосущей силы листа может служить индикатором влагообеспеченности растения. При ухудшении условий его влагообеспеченности транспирация начнет уменьшаться только после того, как дефицит влаги в листе станет устойчивым и увеличение сосущей силы не сможет быть скомпенсировано. С этой точки зрения и концентрация клеточного сока, и сосущая сила позволяют более оперативно оценивать потребности растения во влаге, чем интенсивность транспирации.

Так же как транспирация, рассматриваемые параметры заметно меняются в процессе роста растений. Критические (с точки зрения влагообеспеченности растения) значения концентрации клеточного сока и сосущей силы не только дифференцируются по сортам и культурам, но и меняются в зависимости от фаз и стадий развития растений, специфики почвенно-климатических условий и т. п.

Для каждой фазы развития растений характерен определенный уровень параметра, обусловленный физиологическими особенностями развития. Концентрация клеточного сока по мере старения ткани, как правило, растет. Уменьшение транспирации и ослабление влагообмена внутри травостоя характеризуется устойчивым снижением концентрации клеточного сока нижних ярусов листьев по отношению к верхним ярусам. Этот фактор усиливается по мере роста и развития растений, и для поздних фаз отношение концентрации клеточного сока верхних и нижних ярусов в несколько раз больше, чем для ранних, когда травостой относительно прозрачен и хорошо продувается ветром. В зависимости от того, в каком ярусе расположен лист, интенсивность фотосинтеза и транспирации изменяется. Соответственно меняется и «нормальный» состав клеточного сока.

Следует отметить, что физиологические показатели типа концентрации клеточного сока и т. п. неоднозначны, так как по существу они сигнализируют только об отклонении от нормального хода физиологических процессов. При возникновении угнетения растений невозможно прямо определить, какие изменения условий необходимы. Примером может быть поведение растений при избыточном водоснабжении, когда возникают изменения концентрации клеточного сока, вызванные нарушениями дыхания в корнеобитаемом слое (табл. 3) [4].

Таблица 3

Влияние влагообеспеченности растений на показатели концентрации клеточного сока и сосущей силы листа

Показатель	Контроль, 65% НПВ	Избыток влаги, 90% НПВ	Затопление, 110% НПВ
Бутонизация			
Концентрация клеточного сока (%)	10,18	10,98	12,98
Сосущая сила (атм.)	11,1	12,7	16,2
Плодообразование			
Концентрация клеточного сока (%)	11,3	11,0	15,11
Сосущая сила (атм.)	12,2	12,2	20,3

Примечание. НПВ — наименьшая полевая влагоемкость.

Многообразные реакции растений на отклонения от нормальных условий могут свидетельствовать о различных требованиях растений к влагообеспеченности в разных фазах развития.

Как концентрация клеточного сока, так и сосущая сила листа при прочих равных условиях зависит от обеспечения растений элементами минерального питания. Особенно заметна эта зависимость по фосфору.

Концентрация клеточного сока связана с метеорологическими факторами и имеет четко выраженный суточный ход. При этом в относительных величинах амплитуда суточных колебаний концентрации клеточного сока значительно меньше амплитуды изменений транспирации.

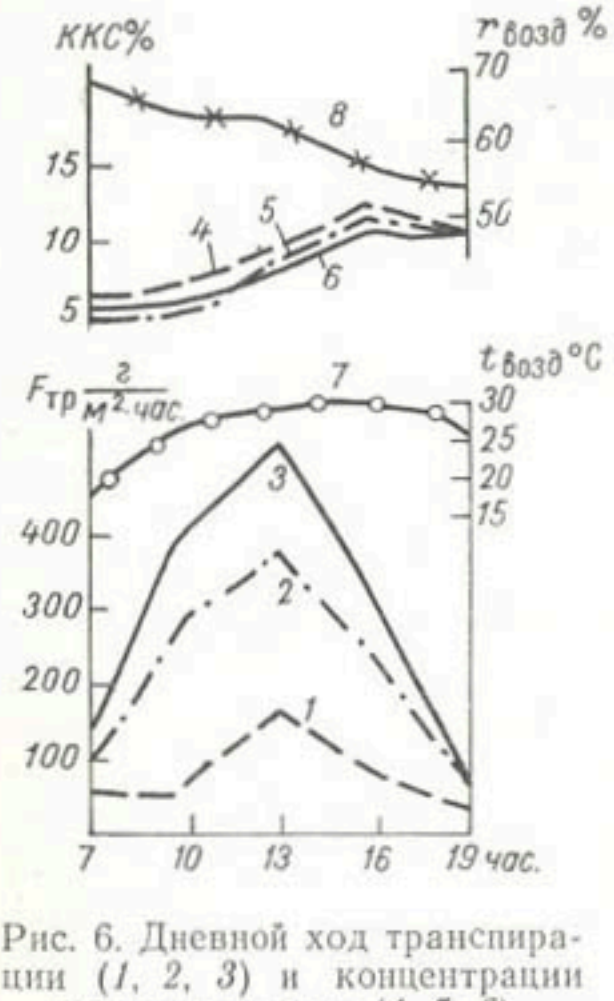


Рис. 6. Дневной ход транспирации (*1*, *2*, *3*) и концентрации клеточного сока (*4*, *5*, *6*).

7 — температура воздуха, *8* — относительная влажность воздуха; *1*, *4* — при влажности почвы 62% ПВ, *2*, *5* — при влажности почвы 80% ПВ, *3*, *6* — при влажности почвы 93% ПВ.

Типичный дневной ход транспирации и концентрации клеточного сока приведен на рис. 6. Очевидно, что при оценке влагообеспеченности по интенсивности транспирации принципиальное значение имеет жесткая привязка к моменту наблюдений, что не так существенно при использовании параметра концентрации клеточного сока или сосущей силы как критериев влагообеспеченности растений.

Моменты достижения максимума и минимума концентрации клеточного сока в суточном ходе существенно сдвинуты по сравнению с суточным ходом транспирации (сдвиг во времени на 4—6 часов). Это можно объяснить инерцией всасывания влаги корневой системой и относительно слабым влиянием сосущей силы листа на скорость перемещения влаги в растении.

Амплитуды суточных изменений как транспирации, так и концентрации клеточного сока зависят от степени влагообеспеченности растений. Весьма существенно, что в условиях дефицита влаги амплитуда изменений концентрации клеточного сока значительно увеличивается при относительном уменьшении амплитуды транспирации. Такой ход параметров логически обоснован для крайнего случая, в котором из-за большого дефицита влаги наблюдается уменьшение транспирации. В условиях полива с поддержанием влажности почвы, близкой к оптимуму, картина обратная: концентрация клеточного сока в течение суток практически постоянна, а амплитуда транспирации в 5—6 раз больше, чем при малом влагосодержании почвы.

В практически важных промежуточных условиях амплитуда изменений транспирации при малых дефицитах влагообеспеченности растений может оставаться неизменной при росте колебаний концентрации клеточного сока. Благодаря этому при измерении концентрации клеточного сока можно выявить малый дефицит влаги.

Взаимосвязь между концентрацией клеточного сока и метеорологическими факторами иллюстрируется в табл. 4 [27]. Здесь рассматриваются связи концентрации клеточного сока с влажностью почвы, температурой, абсолютной и относительной влажностью и дефицитом насыщения воздуха (исследования проводились в течение трех лет на растении чая).

Таблица 4

Взаимосвязь между концентрацией клеточного сока и метеорологическими факторами

Показатель	Влажность почвы	Температура воздуха	Абсолютная влажность воздуха	Относительная влажность воздуха	Дефицит насыщения
Коэффициент корреляции	$-0{,}83\pm0{,}037$	$0{,}52\pm0{,}088$	$0{,}12\pm0{,}11$	$-0{,}52\pm0{,}087$	$0{,}63\pm0{,}072$

При наличии перечисленных существенных корреляционных связей основной является связь между концентрацией клеточного сока и влажностью почвы. Остальные метеопараметры связаны с концентрацией клеточного сока через механизм транспирации, интенсивность которой определяется при прочих равных условиях дефицитом насыщения воздуха. Величина дефицита насыщения, как уже отмечалось, характеризует потенциально возможное испарение при полной влагообеспеченности растений.

Применение показателя концентрации клеточного сока или сосущей силы для диагностики влагообеспеченности растений уже давно привлекает внимание исследователей, и имеется достаточное количество экспериментальных данных, касающихся связи фактических значений этих параметров со степенью влагообеспеченности растений.

§ 5. Тургорное давление и скорость течения сока

В качестве одного из параметров для оценки влагообеспеченности растений можно использовать тургорное давление или какие-либо показатели, связанные с ним. В процессах взаимодействия влаги с элементами растительного организма существенное значение имеют силы гидростатического давления, возникающие

благодаря эластичности стенок клетки. Уже отмечалось, что этот параметр, обычно называемый тургорным давлением, является существенным элементом в формировании дефицита диффузионного давления в растении. Внешне тургорное давление проявляется как упругость элементов растения (листьев, стеблей и т. п.) и, в частности, как упругость устьичных клеток, обусловливающих нормальное управление транспирацией. В свою очередь и само тургорное давление удается связать определенным соотношением с влагообеспеченностью и относительной долей связанной и свободной воды в тканях растения.

Один из распространенных методов оценки тургора как раз и состоит в определении общего влагосодержания тканей. Многие

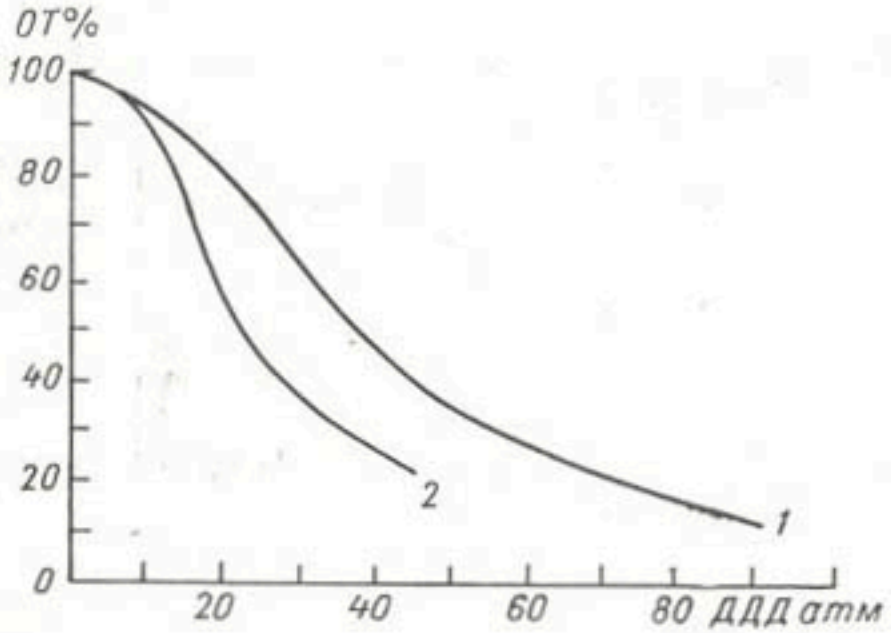


Рис. 7. Зависимость относительного тургора (*ОТ*) от дефицита диффузионного давления (*ДДД*).

1 — бирючина, *2* — томаты.

исследователи применяли для этой цели показатели типа $\frac{C_в}{B_в} = \frac{\text{сухой вес}}{\text{сырой вес}}$ или $\frac{B_в - C_в}{C_в}$. Недостаток последних состоит в том, что показатели $C_в$ или $B_в$, по которым нормируется параметр влагосодержания ткани, меняются в пределах периода вегетации. Везерли, например, предложил использовать более стабильный показатель тургора, введя в определение тургорный вес $T_в$, равный весу ткани при полном насыщении влагой. Относительный тургор *ОТ* в этом случае определяется как отношение фактического влагосодержания $B_в - C_в$ к дефициту тургорного влагосодержания $T_в - C_в$:

$$ОТ = \frac{B_в - C_в}{T_в - C_в}. \qquad (I.8)$$

Были высказаны соображения, что лучше называть данный параметр относительным влагосодержанием, так как связь между ним и тургором нарушается при малых значениях *ОТ*. Связь *ОТ* с дефицитом диффузионного давления *ДДД* показана на рис. 7.

Тургор растительных тканей обеспечивается преимущественно

свободной влагой. Изменение тургора в процессе вегетации и при внешних воздействиях можно оценивать также по соотношениям между свободной и связанной влагой.

По мере развития растений, как показывают экспериментальные данные, содержание связанной влаги растет, а общее влагосодержание и количество свободной воды уменьшается. Отношение свободной влаги к связанной в соответствии с этим также уменьшается.

Было установлено, что по мере уменьшения количества доступной влаги в почве наблюдается незначительное уменьшение общего влагосодержания листьев при заметном уменьшении количества свободной влаги в листе. Отношение свободной влаги к связанной в этих условиях меняется достаточно сильно (почти в 2 раза).

В случае применения оценок влагообеспеченности растений по соотношению свободной и связанной влаги необходимо иметь в виду, что это соотношение, так же как и концентрацию клеточного сока, нельзя считать прямо зависящим от количества влаги в почве. Как уже отмечалось, пропорциональность нарушается при переувлажнении, которое воздействует на физиологические характеристики аналогично дефициту влаги. В данном случае при избытке воды в почве уменьшается общее влагосодержание листьев и количество свободной воды, количество связанной влаги возрастает.

Указанные взаимодействия физиологи объясняют тем, что при избытке влаги в почве и нарушении аэрации блокируется система корневого питания. Подобные факты свидетельствуют в пользу того, что цепь передачи влаги от почвы через корень, стебель и лист нельзя рассматривать как пассивную гидравлическую систему, в которой поток однозначно определяется соотношением капиллярного потенциала и гидравлического сопротивления. Такого рода модели применимы в ограниченных пределах. Фактически же дефицит диффузионного давления в растении регулируется биологически активной системой, механизмы действия которой недостаточно изучены. Это тем более справедливо при использовании таких сложных параметров как тургор, в регулировании которых биологические факторы имеют решающее значение.

Помимо упоминавшихся количественных характеристик тургора, в практике часто используются и его качественные оценки — завядание растений. Подобные оценки могут производиться в полуденные часы по упоминавшемуся выше дневному привяданию из-за фиктивного дефицита влаги, компенсируемого притоком влаги в периоды пониженной транспирации. Независимо от степени завядания появление нарушения тургора в периоды максимума радиационного баланса может рассматриваться как сигнал о потребности растения во влаге. Полив по этому признаку позволяет предупредить факт наступления устойчивого завядания, свидетельствующего о хроническом дефиците влаги.

Как уже отмечалось, при возникновении ограничений в водоснабжении в первую очередь изменяется концентрация клеточного сока, так как при открытых устьицах уровень транспирации поддерживается постоянным за счет запаса воды в листе. Одновременно наблюдается и рост сосущей силы листа. Если прирост потока влаги в этих условиях мал, то за счет обезвоживания тканей листа начинает проявляться уменьшение тургорного давления. В первую очередь это становится заметным по сокращению размеров клеток, что (по крайней мере внешне) наиболее сильно выражается в изменении состояния устьичных клеток. Прикрытие устьиц при уменьшении тургора снижает транспирацию и предупреждает опасное для жизни растения обезвоживание тканей листа.

Такие упрощенные представления не исчерпывают сложного механизма устьичной регуляции. На работу устьичного аппарата сильно влияет температура листа и концентрация углекислого газа в устьичной щели, причем эти факторы иногда противодействуют нормальной функции устьиц под действием дефицита влаги. Влияние тургора в данном случае доминирует, и фактическую степень раскрытия устьиц можно использовать для оценок влагообеспеченности растений.

Поскольку перемещение сока в стебле растения отражает потребление влаги, принципиально величина скорости течения сока также может использоваться для диагностики дефицита влаги. Однако сложность определения абсолютных значений скорости течения сока и зависимость этой величины от других факторов питания значительно затрудняют реализацию оценки влагообеспеченности растений по этому параметру. Вместе с тем для определения относительных изменений влагообеспеченности такой подход вполне приемлем. При этом может быть использована как скорость сока в стебле живого растения, так и динамика выделения сока корневой системой при удалении надземной части растения. Естественно, в последнем случае нельзя измерить фактическую скорость в стебле живого растения, так как удаленная часть существенно влияет на абсолютное значение фиксируемой скорости. Количественные соотношения между скоростью сока в живом растении и на срезе трудно оценить, так как одновременно с существенным уменьшением гидравлического сопротивления системы в случае свободного вытекания сока из среза выключается механизм сосущей силы листа и перемещение сока осуществляется только за счет корневого давления. При этом значительное количество почвенной влаги, ранее доступной для живого растения (до 60—80% в зависимости от вида растения), не может быть извлечено из почвы. Уравнение связи между интенсивностью плача $П$ и влажностью почвы W имеет вид

$$П = f(W) = a + bW - cW^2. \qquad (1.9)$$

Значения коэффициентов a, b и c могут меняться в широких пределах в зависимости от вида растения и типа почвы. По некоторым данным, на характер зависимости интенсивности плача от влажности почвы $f(W)$ сильно влияет степень развития корневой системы растения.

Скорость течения сока в растении, так же как и другие физиологические параметры, обладает сезонным ходом и суточным циклом изменений, который сохраняется даже после среза растений. Этот факт иллюстрируется графиком рис. 8. Изменение амплитуды выделения пасоки указывает на зависимость скорости «перекачки» влаги корнями от интенсивности обмена веществ. Хотя в процессе опыта при удалении наземной части растения обмен веществ исключается, в данном случае проявляется своеобразный факт «запоминания» корневой системой нормального режима подачи влаги в растение.

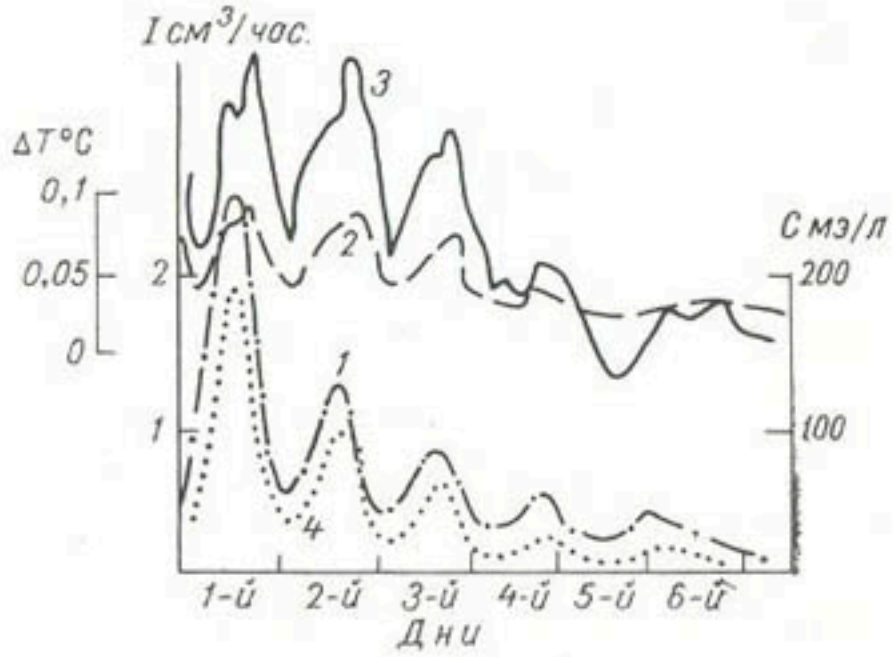


Рис. 8. Изменения во времени интенсивности плача I (*1*), депрессии температуры замерзания пасоки ΔT (*2*), концентрации солей в пасоке C (*3*) и общего выделения солей (*4*).

Измерения скорости течения сока более целесообразно производить непосредственно на живом растении. Хотя и в этом случае практически не удается определить абсолютную величину скорости, такой подход весьма полезен для получения данных об относительных изменениях скорости в зависимости от протекания различных процессов в растении.

В качестве примера можно привести данные об изменениях транспирации и скорости движения сока для растений, выращиваемых при искусственном освещении в контролируемых условиях. На рис. 9 показан суточный ход параметров для случая нормальной влагообеспеченности растений (кривые на рис. 9 *а* и *б*) и для дефицита влаги в почве (начальные участки кривых на рис. 9 *в*). В 10 час. включалось освещение (начало светового дня). На графиках четко прослеживается разница в реакции растения на свет. В опытах *а* и *б* исследовалось влияние отключения света (между 14 и 15 час.). Скорость перемещения сока и величина транспирации менялись в этом случае синхронно и синфазно. В опытах *б* и *в* зарегистрирована реакция на полив растения, находящегося

в условиях дефицита влагообеспеченности. В этом случае изменения синхронны, но находятся в противофазе.

Растение выходит на нормальный режим транспирации и водопотребления после непродолжительных колебаний измеряемых параметров. Уменьшение транспирации сразу же после полива в условиях резкого скачка скорости течения сока может быть связано с реакцией тканей растения на гидравлический удар. Оно, естественно, приводит к последующему уменьшению скорости сока, которое может быть обусловлено увеличением сопротивления проводящего тракта за счет перекрытия на выходном участке (закры-

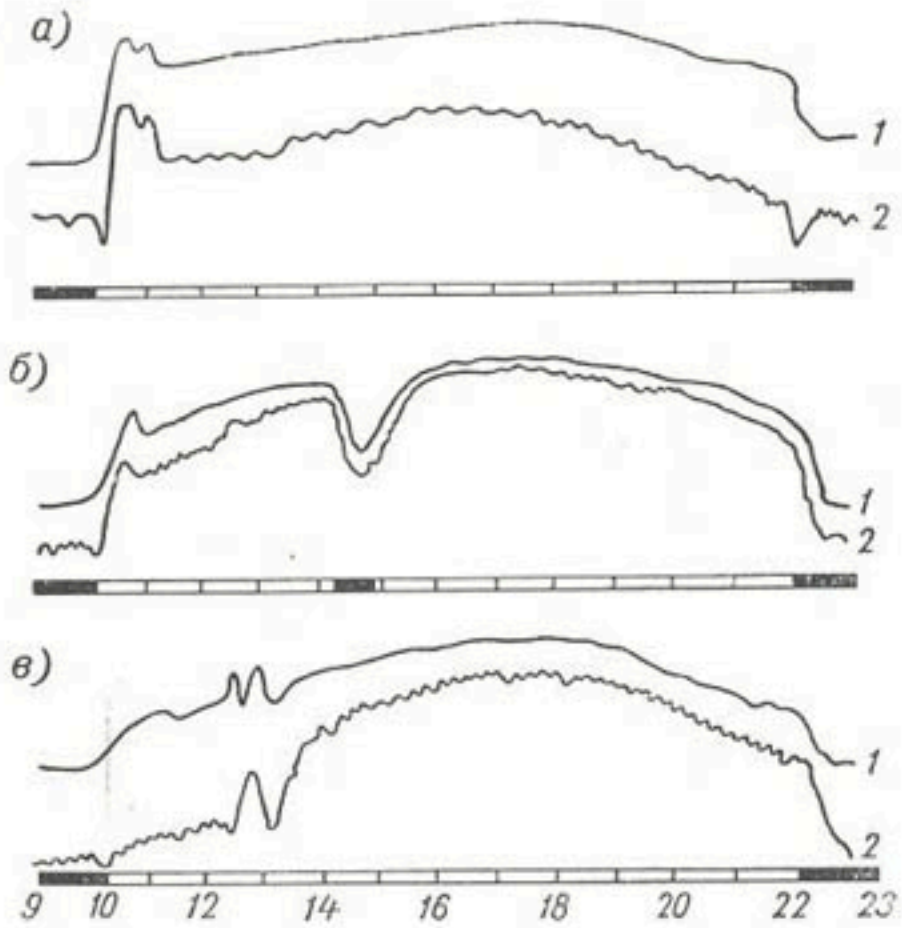


Рис. 9. Влияние режима освещенности и полива на транспирацию (*1*) и скорость течения сока в стебле растения (*2*).

а — контрольный опыт, *б* — отключение света между 14 и 15 час., *в* — полив растения, выдержанного в условиях дефицита влаги.

вание устьиц при уменьшении транспирации) или на входе (перекрытие корневого воспринимающего аппарата). Система каналов растения играет роль линии, в которой ударная волна затухает после отражения от ее концов, наподобие распространения упругих волн вдоль стержня.

§ 6. Методы определения количества влаги в органах растения и скорости течения сока в стебле

Концентрация клеточного сока, сосущая сила листа и тургор связаны с наличием влаги в органах растения и зависят от соотношения между количествами свободной и связанной влаги. Практические методы определения этих параметров во многом аналогичны. По крайней мере, это относится к наиболее распространенным традиционным лабораторным методам, приводящим к разрушению элементов растения при взятии проб.

Для определения количества влаги в органах растения наиболее часто применяются методы, основанные на процессах обмена. Образцы заданного размера (диски или полоски), взятые с определенного участка листа, помещают в камеру и выдерживают там при стабильных условиях. При этом происходит обмен влагой между образцами и средой и через некоторое время устанавливается устойчивое равновесие. По изменению характеристик образцов определяют фактическое значение интересующего нас параметра в листе. В этой группе имеются методы жидкостного обмена [4, 24], при осуществлении которых образцы выдерживаются в серии растворов различной концентрации. Раствор, в котором ткани не теряют и не приобретают воду, рассматривается как равновесный по осмотическому потенциалу.

Аналогичная картина имеет место при использовании метода обмена паром, когда при определении количества влаги в органах растения образцы размещают в эксикаторах с выбранной шкалой упругости паров воды. Метод обмена паром целесообразно применять при средних и больших значениях сосущей силы, а метод жидкостного обмена — при малых величинах этого параметра. При несоблюдении такого требования могут существенно увеличиться погрешности измерений. В частности, разрешающая способность метода обмена паром дает возможность измерять осмотическое давление клеточной жидкости с точностью до 1—2 атм., что часто бывает недостаточно, а размещение образцов с большим дефицитом влаги в эталонных растворах может привести к поглощению эталонных растворов тканями и завышению измеренных значений влагосодержания тканей.

При реализации методов обмена паром или жидкостью определение влагосодержания производится при измерении характерного размера, объема или веса образца. Эти необходимые измерения делаются непосредственно после подготовки образца и затем, по завершению необходимого цикла экспозиции, в камере. Для повышения точности измерений обработка материалов ведется обычно следующим образом: определяется относительное изменение параметра (размера, веса и т. п.) при экспозиции в каждой из камер, а потом строится график зависимости этого относительного изменения от концентрации эталонного раствора (упругости паров воды, сосущей силы раствора и т. п.). Значение параметра определяется интерполяцией для условий, соответствующих отсутствию относительного изменения размера или веса.

Возможна оценка состояния образца по плазмолизу (отслоению протоплазмы от стенок клетки). В растворе, близком к равновесному, наблюдается минимальный плазмолиз. Степень отслоения протоплазмы увеличивается по мере роста концентрации раствора, в котором находится образец ткани растения.

При реализации метода жидкостного обмена сосущую силу или концентрацию клеточного сока можно получить по изменению свойств эталонного раствора, в котором производилась обработка

образца. Изменение концентрации раствора определяют обычными методами химического анализа.

Большое распространение в подобных исследованиях получили рефрактометрические методы.

Чрезвычайно удобным и простым методом измерения влагосодержания тканей растения является метод В. С. Шардакова [30], когда об изменении концентрации эталонного раствора судят по изменению его плотности, определяемому с помощью серии окрашенных тест-растворов с разной плотностью.

Методы жидкостного обмена могут применяться и для оценки тургора. При этом последовательно устанавливается вес образца в натуральном виде, при полном увлажнении тканей и при полном обезвоживании, затем определяется один из упоминавшихся выше относительных показателей состояния тургора.

Для определения концентрации клеточного сока или сосущей силы листа может применяться и психрометрический метод. Он будет изложен более детально в разделе, посвященном определению характеристик почвенной влаги. Переход от влажности воздуха к концентрации клеточного сока или сосущей силе осуществляется по градуировочным характеристикам.

Другой тип методов связан с выделением сока из образца и последующим анализом. Для выделения сока из образца применяются как экстракционные методы, так и методы давления. Сок из образца должен быть удален полностью. Это особенно существенно в случае применения экстракционных методов, при которых необходимо обеспечить разрушение стенок клеток во избежание существенных ошибок измерений. Для анализа концентрации сока широко применяются рефрактометрические методы, а также обычные методы биохимических анализов.

Все перечисленные методы связаны со взятием проб и специальной подготовкой образцов для измерений. Независимо от точности и удобства того или иного метода, следует во всех случаях обращать особое внимание на статистическую достоверность материалов и идентичность проб и образцов. Как показал опыт работы с критериями влагообеспеченности растений типа концентрации клеточного сока, в пределах одного растения и даже одного листа могут наблюдаться существенные вариации характеристик и систематические отклонения измеряемых показателей от средних значений. Поэтому для проб необходимо отбирать листья, одинаково расположенные на стебле, и брать образцы из одной зоны листа. Следует иметь в виду, что малозаметные недостатки и неточности при подготовке образцов могут поставить под сомнение результаты сложных и трудоемких наблюдений.

В последнее время большое внимание уделяется вопросам разработки неразрушающих методов оценки концентрации клеточного сока. В первую очередь это работы по изучению комплексного электрического сопротивления тканей живого растения и зависимости этого параметра от степени влагообеспеченности растений

[4, 7]. Лабораторные исследования выявили наличие подобной зависимости, но недостаточная подготовленность методов такого рода пока не позволяет обсуждать вопрос о практическом применении подобных критериев влагообеспеченности растений.

Измерения электрического сопротивления растительных тканей производится обычно на стебле, реже на листе. Для стеблей и черешков применяются игольчатые электроды. Материал и конструкция электрода не должны вызывать нарушений процессов жизнедеятельности в растении. Так как клеточный сок представляет собой электролит сложного состава, измерения ведутся на переменном токе низкой частоты (обычно до 1000 гц), что позволяет предупредить поляризацию контактов. В некоторых случаях для уменьшения погрешностей из-за поляризации измеряют реактивную составляющую сопротивления или обращаются к иным электрическим характеристикам типа диэлектрических потерь в растительной ткани. В подобных случаях применяют электроды, изолированные от листа, либо последовательно с исследуемым образцом в измерительную цепь включают конденсатор.

Измерения осуществляют с помощью равновесных мостов переменного тока. Применяют как стандартную аппаратуру, выпускаемую промышленностью, так и специальные мосты, приспособленные для использования с датчиками, разработанными для исследования электрического сопротивления тканей. При использовании стандартной аппаратуры, когда непосредственно измеряется сопротивление или емкость объекта, особое внимание необходимо обращать на поддержание идентичных условий. В специализированной аппаратуре можно устанавливать компенсационный элемент, который существенно уменьшит влияние внешних условий (температуры и т. п.).

Помимо упоминавшегося выше метода водного обмена, для оценок состояния тургора могут употребляться:

а) методы количественного определения влагосодержания листьев и разделения влаги листа по степени и характеру связи. Применение их связано с изотермической сушкой и весовыми измерениями. При обработке данных оценивается соотношение между свободной и связанной влагой в тканях, а также рассчитываются различные показатели относительного состояния тургора;

б) визуальная оценка тургора травостоя. Метод этот применим в полевых условиях, достаточно прост и не требует технического обеспечения. При использовании визуальных оценок тургора как показателя влагообеспеченности растения контроль состояния растений на поле производился в полуденные часы, когда наиболее явно выявляются признаки относительного или абсолютного дефицита влаги. При появлении признаков увядания (например, опускание концов листьев) назначается полив. Применение визуальной оценки возможно не на всех сельскохозяйственных культурах, так как способность восстанавливать тургор не у всех растений

одинакова. Некоторые опыты, например, указывают на недопустимость применения подобных методов для многих злаков, в частности, для пшеницы, а для сахарной свеклы и кукурузы такие методы возможны;

в) методы определения тургора по степени раскрытия устьиц, предусматривающие микроскопные исследования и измерения либо непосредственно на листе, либо на реплике, изготавливаемой по листу с помощью маловязкого быстросохнущего лака. Чем ниже вязкость лака, тем меньшие устьица могут быть измерены с помощью метода реплик. (Очевидно, что для подобных измерений требуется достаточно квалифицированный обслуживающий персонал.) Несколько более распространен косвенный метод определения степени раскрытия устьиц по скорости проникновения цветового индикатора внутрь листа (метод инфильтрации). Оценка осуществляется по изменению цвета листа. Возможны две модификации метода. В первой степень раскрытия устьиц характеризуется непосредственно временем проникновения индикатора в кутикулу листа. Другая модификация предусматривает использование серии эталонных индикаторов различной вязкости. Степень раскрытия устьиц в этом случае характеризуется наименьшей вязкостью индикатора из группы растворов, не прошедших через устьице;

г) измерение тургора листа или черешка по упругости тканей, определяемой при помощи тензометрического датчика. Этот метод, наиболее новый и перспективный, приспособлен для работы на живом растении. Подобные датчики можно использовать [26] не только в лабораторных условиях, но и в различных культивационных сооружениях и даже в поле, хотя в последнем случае могут существенно повыситься погрешности, которые возникнут за счет ветровых динамических нагрузок, испытываемых растением. Для оценки тургора используются проволочные тензодатчики в сочетании с обычными мостовыми измерителями сопротивления чувствительного элемента. Как правило, при этом необходима компенсация температурной погрешности.

В целом работы такого направления только начинают развиваться и возможности их еще полностью не выявлены.

Что касается различных методов определения скорости движения сока в растении, то следует отметить, что они не нашли практического применения для определения влагообеспеченности растения, хотя принципиально такие возможности имеются. Наиболее распространены разрушающие методы. При их реализации скорость движения сока определяется по интенсивности плача (вытеканию сока из среза) после среза растения. Для оценок влагообеспеченности эти методы на практике также не применялись.

В настоящее время существует несколько вариантов конструкций приборов, которые по скорости движения сока на живом растении могут дать оценку влагообеспеченности растения [15].

В приборе, схема устройства которого представлена на рис. 10, используется известный принцип теплового измерителя расхода жидкости. Если осуществлять нагрев трубы, по которой течет жидкость, и измерять температуру жидкости (или стенки трубы) до и после нагревателя, то в зависимости от скорости и направления потока жидкости будет изменяться величина и знак перепада температуры, так как условия прохождения тепла будут существенно различаться по направлению и против направления потока жидкости. Датчик *3* практически будет измерять температуру жидкости, так как поток будет относить тепло в сторону нагревателя. Датчик *4* будет фиксировать изменение температуры, так как все тепло, выделяемое нагревателем, переносится в сечение, где он установлен. Дифференциальная схема измерительного моста позволяет значительно повысить точность измерения перепада температуры и исключить возможные погрешности из-за нестабиль-

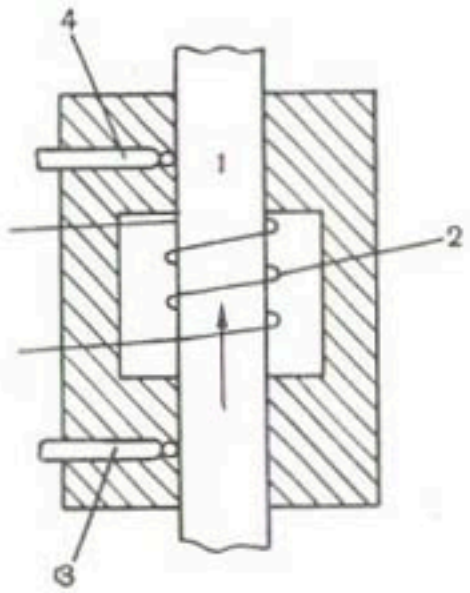


Рис. 10. Схема датчика для измерения скорости движения сока в стебле растения.

1 — стебель, *2* — нагреватель, *3—4* — термисторы.

ности температуры растения. Включив термометры в такую схему, на выходе моста получают сигнал, пропорциональный изменению скорости потока в трубе.

Некоторые ограничения в применении этого метода связаны с тем, что для абсолютных измерений скорости необходима тарировка датчика по скорости течения непосредственно на месте установки, что, конечно, невозможно при использовании теплового датчика скорости для определения движения сока в растении. Кроме того, по мере роста растения могут изменяться размеры стебля и соответственно меняться характеристики прибора.

В варианте конструкции АФИ прибор предназначается для оценки относительных изменений скорости движения сока в стеблях растений. В качестве датчиков температуры использованы полупроводниковые микротерморезисторы, а в качестве нагревателя — специальный термоэлемент, имеющий такие же размеры, как микротерморезистор. Благодаря малой инерции датчиков прибор позволяет изучать реакцию растения и используется в комплекте аппаратуры для автоматического полива по сигналам с растения.

§ 7. Параметры, характеризующие развитие растений

Решение задачи оптимизации условий влагообеспеченности наиболее полно достигается при оценке этих условий по максимальному выходу полезной продукции. Один из вариантов реализации этого принципа связан с определением интенсивности фотосинтеза. При нелимитированной подаче воды температура в зоне расположения фотосинтезирующих элементов, состав клеточного сока и условия транспорта CO_2 через устьица обеспечивают максимальный фотосинтез для данных условий питания и освещения. При дефиците влаги возникают нарушения в составе клеточного сока и фотосинтез несколько уменьшается. При более глубоком дефиците влаги развиваются явления ослабления тургора и в первую очередь начинают закрываться устьица, а при длительном дефиците развивается общее завядание растений. В процессе перекрытия устьиц происходит уменьшение притока углекислого газа в активную зону листа, обусловленное ростом сопротивления диффузии углекислоты через зону устьиц. В сочетании с ростом концентрации клеточного сока и повышением температуры листа это вызывает резкое уменьшение интенсивности фотосинтеза. Фактически же эти процессы более сложны и взаимосвязаны, так как степень раскрытия устьиц определяется не только обводненностью тканей, но и концентрацией CO_2 в воздухе устьичных камер, температурой листа и другими факторами.

Рассматривая вопрос об измерениях или оценках влагообеспеченности растений по интенсивности фотосинтеза, анализируют обычно изменчивость только тех параметров, пригодных для диагностики состояния растения, которые в реальных условиях измерительных площадок определяются относительно просто. В данном случае это особенно существенно вследствие сложности точных измерений фотосинтеза.

При использовании фотосинтетических показателей следует иметь в виду, что отсутствие однозначных связей между количеством и качеством полезных продуктов и вегетативной массой растений не позволяет формально оптимизировать условия развития по критериям, связанным с максимальными приростами зеленой массы. С другой стороны, уже отмечалось, что факт получения специфических полезных продуктов жизнедеятельности растений (как правило, элементов репродуктивных органов) практически не может быть зафиксирован до полного завершения процессов формирования урожая. Во многих случаях до снятия урожая и его дополнительной обработки невозможна оценка эффективности полезного фотосинтеза. Это относится и к количеству и к качеству сельскохозяйственной продукции. Поэтому для различных фаз развития растения критерием оптимальности условий могут оказаться объем корневой системы, объем зеленой массы, относительная площадь листьев, а также более сложные физиологические или биохимические показатели. В достаточно строгой постановке

не может быть определен единый фотосинтетический критерий влагообеспеченности растения для всех фаз его развития.

Интенсивность фотосинтеза — весьма чувствительный индикатор, реагирующий на изменение всех факторов питания более сильно, чем рассмотренные выше биологические критерии влагообеспеченности растения [17]. Кроме того, интенсивность фотосинтеза может рассматриваться как абсолютный индикатор состояния растительного покрова, а все упоминавшиеся выше показатели являются по сути дела косвенными, хотя они могут быть использованы для диагностики состояния растений.

Возможны различные формы применения критериев интенсивности фотосинтеза для диагностики состояния растений. Одна из них предусматривает сравнение интенсивности фотосинтеза с эталонным ходом процесса в оптимальных условиях. В этом случае для оценки ситуации необходим детальный анализ всех условий для выявления причины отклонения от нормы.

Применение фотосинтетического критерия связано с регистрацией динамики интенсивности фотосинтеза. Поскольку различные факторы питания меняются во времени в различном темпе, анализ динамики может позволить выявить решающий фактор, ответственный за изменения фотосинтеза на данном этапе развития растения.

В качестве примера можно отметить различную скорость выноса растением из почвы воды и питательных веществ. Сравнивая интенсивность фотосинтеза при поливе и в межполивной период, можно фиксировать изменение величины влагообеспеченности растения. Сопоставление данных с эталонным ходом позволит оценить обеспеченность растений питательными веществами.

Были проведены исследования по выявлению возможностей полуэмпирического расчета оптимального хода фотосинтеза. Расчет проводился для условий максимального использования фотосинтетически активной радиации. Коэффициент полезного действия поглощения радиации и экспериментальные данные о ходе продуктивности фотосинтеза дают возможность рассчитывать необходимую площадь листьев и прирост сухого вещества. Затем по транспирационным коэффициентам определяются режимы потребления влаги.

Такая идеализированная расчетная зависимость в принципе может быть использована в качестве эталонной при обработке фактических данных и составлении прогноза условий на поле, а также при регулировании условий выращивания в производственных условиях.

Один из критериев оценки интенсивности фотосинтеза связан с учетом накопления органических веществ [8]. Полагая, что для образования в растении 1 моля органического вещества вида $(CH_2O)_n$ необходима ассимиляция n молей CO_2, можно оценивать интенсивность фотосинтеза, определяя поглощение углекислого газа отдельным растением или растительным покровом в целом.

Этот параметр более универсален, чем объем зеленой массы или листовой индекс, так как процессы образования органических веществ идут в течение всего вегетационного периода, в том числе и после прекращения роста растений и накопления зеленой массы. Поэтому по эталонным характеристикам потребления углекислоты можно оценивать ход процесса и отклонение фактических условий от эталонных оптимальных, в том числе и по параметрам, связанным с влагообеспеченностью растений.

Была предложена расчетная схема, связывающая некоторые характеристики растительного покрова с параметрами микроклимата и скоростью ассимиляции углекислоты [6]. При выводе основного уравнения было принято, что скорость ассимиляции углекислоты A связана с величиной фотосинтетическиактивной радиации Q следующим соотношением:

$$A = \frac{\alpha Q}{1 + \alpha Q / A_m}, \tag{I.10}$$

здесь α — коэффициент, зависящий от к. п. д. использования фотосинтетическиактивной радиации; $A_m = \nu C$ — скорость ассимиляции при больших величинах Q [C — концентрация углекислоты, ν — коэффициент пропорциональности, зависящий от температуры и других факторов (в том числе и от факторов водного и минерального питания растения)].

За счет поглощения фотосинтетическиактивной радиации внутри растительного покрова устанавливается следующее распределение радиации:

$$Q = Q_H \exp[-\gamma S (H - z)], \tag{I.11}$$

где z — вертикальная координата, H — высота растительного покрова, S — площадь фотосинтезирующей поверхности листьев, приходящаяся на единицу площади поля и на слой единичной высоты (отношение листового индекса к высоте растительного покрова), Q_H — количество радиации на верхней границе растительного покрова, γ — коэффициент, пропорциональный плотности растительного покрова.

Скорость ассимиляции для всего растительного покрова в целом A_H при высоте покрова H будет

$$A_H = \int_0^H \frac{\alpha S Q_H \exp[-\gamma S (H - z)]}{1 + \dfrac{\alpha Q_H \exp[-\gamma S (H - z)]}{\nu C}} dz; \tag{I.12}$$

значение C в формуле является неизвестной функцией высоты. Эта функция связана как с интенсивностью процесса ассимиляции в слое, так и с турбулентным переносом углекислого газа внутри растительного покрова.

Исходя из указанных соображений, можно составить дифференциальное уравнение переноса углекислоты в растительном покрове. При решении этого уравнения граничные условия определяются потоком CO_2 из почвы и турбулентным потоком из атмосферы, который может быть задан по коэффициенту обмена в приземном слое (интегральный коэффициент турбулентной диффузии) и градиенту концентрации углекислого газа.

Решая полученное уравнение с некоторыми упрощениями и ограничениями, вполне допустимыми для реальных условий, можно оценить интенсивность и продуктивность фотосинтеза для двух крайних случаев, когда интенсивность процесса лимитируется либо концентрацией углекислоты (при «световом насыщении» в растительном покрове), либо факторами освещения (для случая слабого влияния относительно высокой концентрации CO_2 на интенсивность фотосинтеза).

Продуктивность фотосинтеза P определяется как разность ассимиляции и затрат биомассы на дыхание. При этом расход биомассы M считают пропорциональным площади листьев:

$$M = \varepsilon SH.$$

Значение коэффициента ε зависит от морфологических особенностей растения и некоторых других факторов (в частности, от температуры).

Продуктивность фотосинтеза P_Φ в случае «светового насыщения» растительного покрова можно выразить в виде

$$P_\Phi = \frac{kC_\infty}{1 + \dfrac{k}{\sqrt{k_1 \nu SH}} \dfrac{I_0\left(2\sqrt{\nu SH/k_1}\right)}{I_1\left(2\sqrt{\nu SH/k_1}\right)}} - \varepsilon SH. \qquad (I.13)$$

Если продуктивность лимитируется факторами освещенности и не зависит от концентрации CO_2, расчет может производиться по более простой формуле:

$$P_0 = \frac{\nu C_\infty}{\gamma} \ln \frac{1 + \alpha Q_H / \nu C_\infty}{1 + \dfrac{\alpha Q_H \exp(-\gamma SH)}{\nu C_\infty}}. \qquad (I.14)$$

В этих формулах P_0 — продуктивность фотосинтеза при ограниченном освещении; $k = k_1 z$ — интегральный коэффициент обмена над растительным покровом; k_1 — коэффициент, определяющий зависимость интенсивности обмена внутри растительного покрова от высоты z; I_0 и I_1 — функция Бесселя нулевого и первого порядка от мнимого аргумента.

Параметры ν, ε, характеризующие интенсивность процессов ассимиляции и дыхания растения, зависят от многих факторов среды, в том числе и от водного питания растений (это уже отмечалось выше), причем дефицит влагообеспеченности и угнетение

растения приводят к уменьшению параметра ν и увеличению ε. В таких условиях резко меняется интенсивность фотосинтеза и скорость накопления зеленой массы растительного покрова. Приведенные соотношения иллюстрируют возможные зависимости интенсивности фотосинтеза от факторов питания, которые можно использовать для оценки влагообеспеченности растения по продуктивности фотосинтеза.

Оба случая, для которых получены приведенные формулы, могут иметь практическое значение для различных сельскохозяйственных культур, хотя ни один из них не отражает полностью возможных реальных условий.

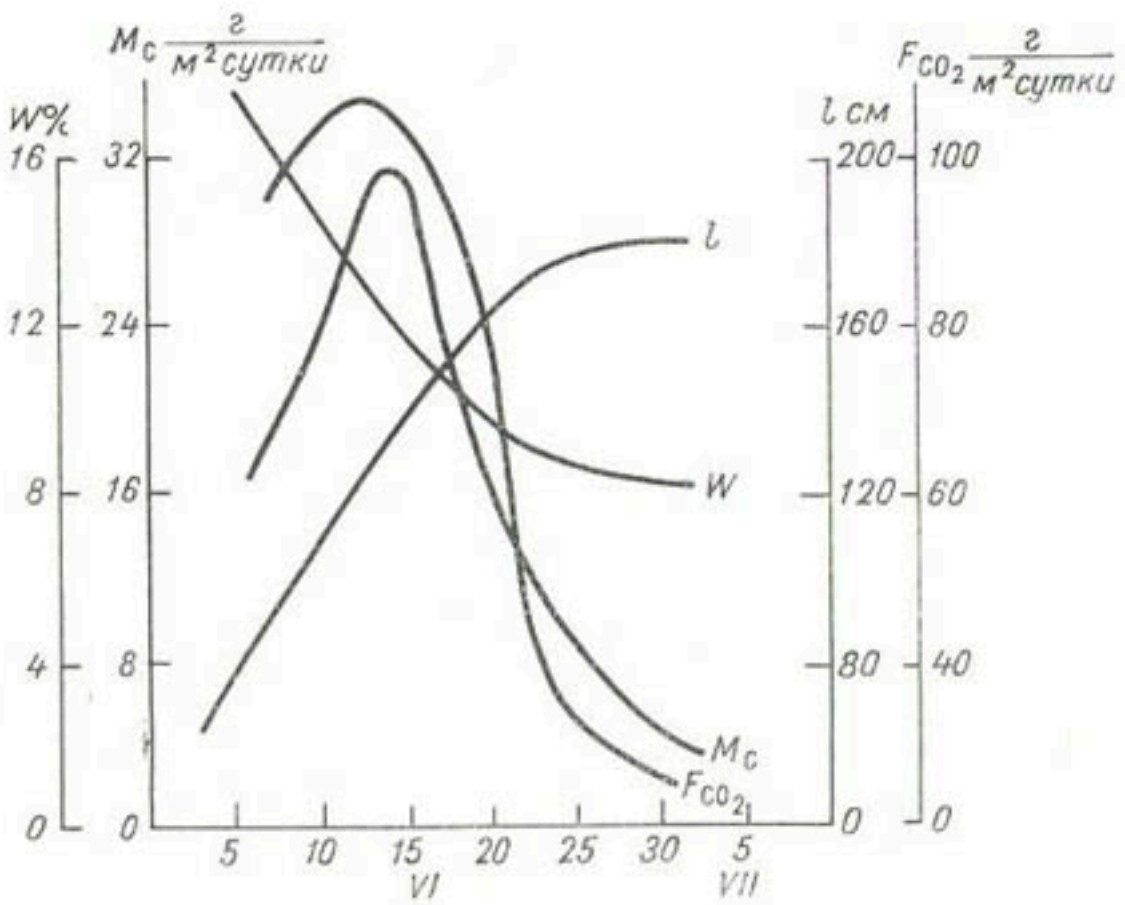


Рис. 11. Изменение во времени фотосинтетических показателей и влажности почвы.

l — длина основного стебля, M_c — прирост сухой массы растительного покрова, F_{CO_2} — поглощение углекислоты из атмосферы, W — фон изменений влажности почвы.

При наличии «прозрачного» травостоя формула (I.13) лучше отражает процессы в растительном покрове. Для плотного сомкнутого травостоя лучшее приближение дает формула (I.14).

Анализ ассимиляции проводился для стационарных условий, когда значение листового индекса SH и высоту растений H можно считать постоянными. Практическое использование приведенных соотношений связано с необходимостью ограничения периода измерений интервалом времени, для которого справедливо положение о постоянстве значений параметров S и H.

Если рассматривать вегетационный период в целом, то динамика этих показателей будет обусловлена в конечном счете интен-

сивностью фотосинтетических процессов за весь прошедший период. Изменение высоты и площади листьев также может быть использовано для диагностики состояния растений, по крайней мере в период интенсивного роста и накопления зеленой массы. Заключительные стадии вегетации при положительной продуктивности растительного покрова, как правило, не связаны с изменением S и H. Поэтому оценки интенсивности фотосинтеза по динамике объема зеленой массы и по показателям роста имеют ограничения во времени и обычно применимы в ранних фазах развития растений.

На рис. 11 сопоставлены материалы, характеризующие ход биометрических и фотосинтетических показателей. Данные графика охватывают основную часть вегетационного периода и позволяют оценить влияние фазы развития на такие параметры, как продуктивность фотосинтеза. Значения продуктивности фотосинтеза и

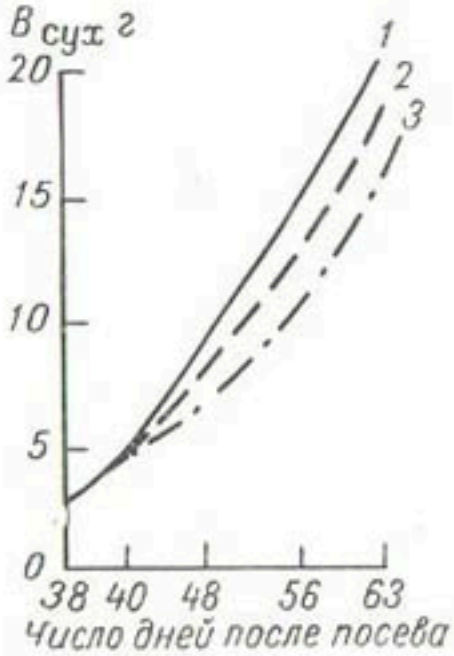


Рис. 12. Влияние дефицита влаги на накопление сухой массы $B_{сух}$ растений томата.

1 — контрольный опыт, *2* — умеренное завядание растений перед поливом (48-й день), *3* — сильное завядание растений перед поливом.

прироста объема сухой массы, начиная с фазы цветения, когда рост растений практически прекращается, соответствуют полезному процессу накопления вещества в репродуктивных органах. Этот график нельзя считать идеальным, так как данные для него получены на неорошаемом поле на фоне естественных изменений агрометеорологической обстановки.

Известно, что нарушения нормального хода влагообеспеченности приводят к уменьшению темпов прироста объема зеленой массы и к замедлению роста растений. В качестве примера можно привести данные для томатов. Из рис. 12 видно, что даже умеренное завядание растений в ранние фазы вызывает заметные отклонения от нормального развития. Подобные ограничения роста и развития отмечались при наличии в почве некоторого запаса доступной влаги (при относительно небольших отклонениях потенциала влаги в почве от диапазона оптимальных условий). Анализ данных такого рода привел к установлению критерия минимальной допустимой влагообеспеченности растений по содержанию почвенной влаги, обеспечивающему нормальные условия их развития.

Необходимость применения этого параметра, часто называемого влажностью замедления роста, в настоящее время широко обсуждается.

Как уже отмечалось, наблюдаются различия в реакции разных органов растения на дефицит их влагообеспеченности. С точки зрения ростовых процессов различия проявляются в том, что наиболее сильно замедляется рост молодых элементов (листьев, побегов, корней). Это вызывает изменение в соотношении между молодыми и старыми элементами растения. Но вместе с тем более лабильные молодые элементы после восстановления нормальных условий быстрее восстанавливают нормальное состояние, чем старые.

С точки зрения последействия дефицит влаги наиболее сильно сказывается на развитии корневой системы. Это особенно заметно на многолетних растениях и на сельскохозяйственных культурах с длительным вегетационным периодом. Ограничение поступления влаги в фазе максимальной скорости роста корневой системы приводит к значительной задержке в развитии растения. Это отставание часто невозможно компенсировать подачей влаги в последующие периоды, хотя при замедлении роста наземных элементов растения вредное действие засухи может быть скорректировано и общая задержка в развитии растения будет незначительной при своевременной ликвидации дефицита его влагообеспеченности.

Таким образом, есть возможность оценить перспективы использования различных показателей фотосинтетической активности для определения влагообеспеченности растения. Для практического применения наиболее удобны и просты методы, основанные на определении листового индекса или высоты растений, хотя они весьма трудоемки. Для оценок влагообеспеченности растения по фотосинтезу можно использовать суммарный объем корневой системы или зеленой массы (сухая масса растения). И, наконец, для оценок влагообеспеченности растения могут применяться измерения потока углекислоты из атмосферы к деятельной поверхности.

§ 8. Методы оценки динамики изменений фотосинтеза

Из различных методов учета интенсивности фотосинтеза по динамике изменений объема зеленой массы или других биометрических показателей растительного покрова кратко рассмотрим только те, которые используются или могут использоваться при определениях влагообеспеченности растения и сигнализации потребности в поливе.

Первая группа методов определения интенсивности фотосинтеза связана с биометрическими измерениями показателей роста или площади листьев. Влагообеспеченность растений может в этом случае определяться по отклонениям от нормального режима их

развития, либо непосредственно по биометрическим показателям, либо по достаточно надежным корреляционным зависимостям между биометрическими показателями и влажностью почвы. В последнем случае возможна также и оценка нормы полива.

Не имеет смысла подробно останавливаться на методах биометрических измерений из-за относительно жесткой специализации их по культурам. Необходимость получения сопоставимых результатов биометрии требует строгой идентичности методов отбора проб и их обработки. При этом часто очень существенными оказываются субъективные факторы. Поэтому желательно ограничение количества персонала, занятого отбором проб. Необходимая репрезентативность биометрических наблюдений достигается за счет большой повторности проб и определения средних значений параметров за достаточно большие интервалы времени (5—7 дней), что обеспечивает исключение случайных отклонений, связанных с кратковременными метеорологическими воздействиями.

Обработка материалов обычно производится в лаборатории. Отобранные пробы доставляются с поля в воздухонепроницаемых мешках. Во избежание потерь образцов в весе и объеме необходима максимальная быстрота измерений и анализов. Это относится не только к операциям взвешивания и сушки, но и к способам определения площади листьев и других показателей.

Среди биометрических наблюдений известную трудность представляет определение веса корневой системы. Эти измерения связаны с отмывкой почвы в специальных лотках, когда необходимо удалить мельчайшие частицы почвы, не теряя мелких элементов корней, не говоря уже о том, что при взятии образца в почве не должны оставаться корни взятого растения.

Развитие электрических методов измерений делает принципиально возможной разработку неразрушающих методов определения объема корневой системы. Для этой цели могут применяться емкостные методы, интенсивно развиваемые для определения влажности почвы. Поскольку емкость конденсатора зависит от диэлектрической проницаемости материала, размещенного между электродами, а этот параметр для почвы существенно отличается от характеристик растительных объектов (в частности, корней), то, размещая непосредственно в почве плоский или цилиндрический конденсатор, охватывающий всю область распространения корневой системы, можно по изменению емкости конденсатора оценивать темп роста корней. Как и для других емкостных методов, для этого случая большую роль будет играть изменение солевого и водного режима почвы, поэтому для правильного определения объема корней необходимо корректировать эти погрешности. Емкостная методика определения объема корневой системы принципиально разработана, но сведений о ее практическом применении нет.

Больших затрат труда требует процесс измерения площади листьев. Для этих целей применяют планиметры или комплект эталонов, существенно упрощающих процесс измерений. Форма

эталона соответствует форме листьев (иногда обобщенной модели листа: круг, эллипс, треугольник и т. п.). В случае неточного совпадения площади листа и эталона допускается интерполяция и ориентировочная оценка отклонения образца от двух ближайших эталонов. В настоящее время описано много специальных приборов для полуавтоматического измерения площади листа по затенению фотоэлемента.

Линейные измерения в биометрических исследованиях обычно не представляют особой трудности, а в условиях лабораторного опыта удается даже автоматизировать измерения и регистрацию интенсивности ростовых процессов. Приборы такого типа известны давно. Для этих целей применяются механические или оптические системы, но наиболее простым представляется реостатный датчик удлинения стебля, обеспечивающий достаточную точность и надежность измерений. Два элемента такого датчика — реостат и движок закрепляются неподвижно на растении на некотором расстоянии друг от друга. При удлинении стебля меняется относительное расположение элементов датчика и движок перемещается вдоль реостата. Изменения могут определяться по величине электрического сопротивления или по напряжению, снимаемому с реостата.

Обычно для диагностики состояния и развития растений используется прямая биометрия на рабочем объекте. В случаях когда проведение таких измерений затруднено какими-либо специфическими особенностями растений, можно применять метод косвенных оценок. В соответствии с этим методом вместе с основной культурой на поле высаживают необходимое количество растений диагностов, отличающихся повышенной чувствительностью фотосинтетической активности или ростовых процессов по отношению к колебаниям влагообеспеченности. В случае необходимости могут производиться повторные посевы диагностов.

При использовании растений диагностов нельзя забывать о том, что развитие единичного растения в сообществе с другой культурой может существенно отличаться от хода развития этого объекта в сообществе однородных растений.

Очевидно, что биометрические методы могут применяться для любых размеров площадок — от вегетационного сосуда до больших полей.

Вторая группа методов определения интенсивности фотосинтеза связана с оценками динамики роста по изменению зеленой массы растительного покрова. Для простейшего случая — выращивания отдельных растений в вегетационном сосуде — определение прироста зеленой массы производится методом взвешивания. Аппаратура и измерительные процедуры в данном случае соответствуют рассмотренным выше (определение транспирации весовым методом).

Для полевых условий может быть реализовано измерение зеленой массы по поглощению γ-излучения. Принципиальные основы

метода даны в разделе, посвященном измерению почвенной влаги. Применительно к определению зеленой массы можно рассматривать растения и приземный воздух как двухфазную систему, каждая из компонент которой характеризуется определенными показателями поглощения γ-излучения. При этом поглощением излучения в воздухе обычно пренебрегают, так как оно мало́. Измеряя интенсивность излучения на выбранном расстоянии от источника, можно определить концентрацию компонент. В данном случае это соответствует массе растительных тканей по отношению к массе воздуха. Градуировка аппаратуры по объему или массе растительных тканей может зависеть от типа растительного покрова, так как рассеяние и поглощение γ-излучения зависит от распределения поглощающего вещества по объему.

Схема измерений дана на рис. 13. Осуществление метода возможно на основе переносной и стационарной аппаратуры. В Ин-

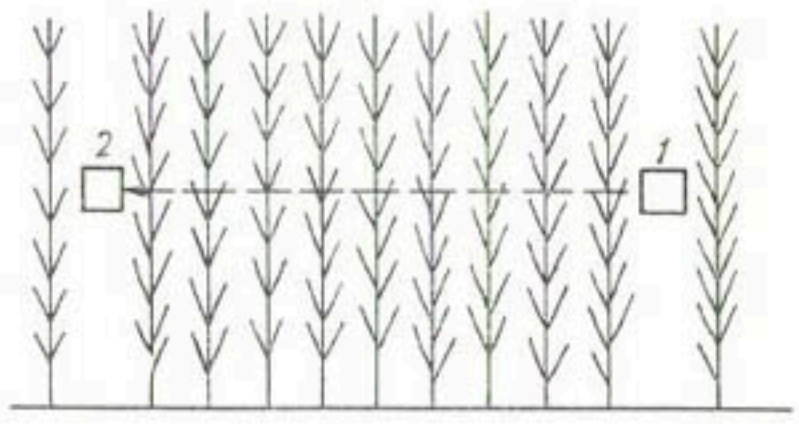


Рис. 13. Схема измерений объема зеленой массы растений в полевых условиях с помощью радиоактивной аппаратуры.

1 — источник γ-излучения. *2* — детектор γ-излучения.

ституте растениеводства в Кведлинбурге (ГДР) реализован комбинированный метод. Источник и приемник размещены на специальных, жестко связанных тележках, которые перемещаются вдоль опытного поля. На участках поля расположен ряд исследуемых культур. Перемещение блока тележек автоматизировано.

Существенным достоинством γ-метода является то, что по сути своей это интегральный метод и при правильном выборе базы (расстояния между источником и детектором радиации) нет необходимости в обеспечении статистической достоверности за счет больших повторностей измерений, так как осреднение по заданному числу объектов осуществляется автоматически.

Другое важное достоинство метода, особенно существенное при исследованиях на стационарных установках типа комплекса института растениеводства в Кведлинбурге,— получение информации в виде, удобном для обработки на ЭВМ.

Ограничения и недостатки метода связаны в основном с необходимостью калибровки системы (датчика с приемником излучения) на эталонах, связанных непосредственно с объектом. Изменение химического состава при смене объектов могут привести к повышению ошибок измерений.

Нежелательные эффекты, связанные с воздействием γ-излучения на растение, могут быть сведены к допустимому минимуму при правильном выборе источника и сокращении дозы γ-излучения за счет уменьшения времени измерений. При выборе источника γ-излучения необходимо учитывать изменения радиочувствительности органов растения в разных фазах развития.

Вопросы, связанные с применением еще одной группы методов — определения интенсивности фотосинтеза по потреблению углекислого газа, будут рассмотрены далее, в разделе, посвященном полуавтоматической аппаратуре, поскольку для этой группы методов необходимо определение коэффициента турбулентного обмена, реализуемое указанной полуавтоматической аппаратурой. Кроме того, применение этой группы методов целесообразно в комплексной аппаратуре для исследований баланса тепла и вещества растительного покрова.

§ 9. Биологические оценки влагообеспеченности растений при управлении поливом

Анализ возможных применений физиологических показателей влагообеспеченности растений показывает, что они могут использоваться только для сигнализации о состоянии растений. С точки зрения технологии полива это означает, что по любому из физиологических параметров непосредственно определяется только срок подачи воды. Нормы полива не могут рассчитываться непосредственно по этим параметрам, и для их определения должны привлекаться материалы по корреляции данного параметра с влажностью почвы.

Расчет нормы полива производят по разности влагосодержания корнеобитаемого слоя при полевой влагоемкости и при критическом значении выбранного физиологического параметра. В некоторых случаях (особенно в условиях лабораторных экспериментов) реализуется полив малой нормой, заведомо не обеспечивающей доведения почвы до полевой влагоемкости. Подача сигнала на полив осуществляется по значениям физиологических показателей. Программа полива жесткая с фиксацией времени подачи воды. Очевидно, что применение поливов малой нормой связано с увеличением числа поливов, что не всегда возможно в реальных условиях на поле.

Физиологические показатели могут использоваться при расчете режимов полива и при прогнозах распределения влаги. Один из методов прогноза заключается в определении потребности во влаге по коэффициенту водопотребления (или транспирационного коэффициента) и планируемой массе урожая (плодов или зеленой массы растений). Общий расход воды, определяемый таким образом, распределяют на несколько поливов. Выбор числа поливов

основывается на предыдущем опыте, а сроки обычно согласовывают с определенными фазами развития.

Прогноз расхода воды сельскохозяйственным полем можно производить, исходя из предпосевных запасов влаги в активном слое почвы. Количество испарившейся воды определяется в этом случае по биологической кривой транспирации, а сроки и нормы полива подбирают таким образом, чтобы обеспечить поддержание оптимального интервала почвенных влагозапасов. В процессе фактического регулирования влагообеспеченности растений в прогноз вносятся коррективы, обусловленные наличием осадков или отклонением фактической транспирации от идеальной биологической кривой.

Управление режимом орошения по значению какого-нибудь физиологического параметра требует построения опорной характеристики (биологической кривой), отражающей его изменения в течение вегетационного периода. Вопросы построения и использования биологических кривых детально разрабатывались А. М. Алпатьевым и А. Р. Константиновым. Более подробно вопрос о методике построения биологических кривых будет рассмотрен в главе III.

При использовании биологических кривых измеренные значения параметра приводятся к стандартным метеорологическим условиям. Формы такого приведения вырабатываются конкретно для каждого параметра с учетом его особенностей. В частности, для более полно разработанного вопроса об использовании показателя транспирации такое приведение осуществляется нормированием по величине испаряемости (максимально возможного испарения). Зависимость транспирации от фазы развития растений может учитываться при построении графиков биологических кривых как зависимости приведенной транспирации от времени (учитывается интервал с момента посева) или от суммы температуры за интервал с момента посева. В последнем случае использование параметров типа суммы температур позволяет исключить влияние изменений темпов развития растений, зависящих от погодных условий, и получить более универсальную биологическую кривую.

Только при подобной организации обработки материалов наблюдений удается получить достаточно надежные корреляционные связи параметров состояния растений с влажностью почвы, необходимые для расчетов норм полива.

Аналогичный подход применяется и при использовании других физиологических показателей, для которых сроки и нормы полива определяются с помощью биологических кривых. Это относится и к параметрам динамики фотосинтеза, и к концентрации клеточного сока, и к тургору и т. д.

Несмотря на недостаточную обоснованность эмпирического подхода и значительные экспериментальные трудности, связанные с применением физиологических оценок влагообеспеченности растений, проведена серия экспериментов с целью доказательства

возможности использования их для диагностики состояния растений.

При экспериментах такого рода использовались данные об изменчивости физиологических показателей в условиях дефицита влагообеспеченности (без полива) и оптимальной влажности почвы (полив при 70—80% ПВ). Характер изменений транспирации и концентрации клеточного сока в течение дня иллюстрируется табл. 5 [4].

Таблица 5

Физиологические показатели для гороха в период цветения

Вариант опыта	Время наблюдений, часы	Транспирация, г/м²	Концентрация клеточного сока, %
Без полива	9	19,1	14,8
	12	18,9	16,9
	14	11,7	11,7
	16	9,7	12,0
	18	—	17,4
Полив при влажности почвы 80% ПВ	9	66,5	11,7
	12	41,0	11,3
	14	32,4	11,1
	16	4,7	10,6
	18	—	11,7

Вариации температуры листьев можно оценить по перепаду температур между воздухом и листом, так как этот параметр позволяет исключить влияние изменений температуры воздуха (табл. 6).

Таблица 6

Перепад температуры между листом и воздухом для сахарной свеклы в °С

Температура воздуха, °С	Ярус листьев от точки роста				Окраска листьев	
	3	5	7	9	светло-зеленая	темно-зеленая
Контрольный участок						
23,4	4,4	5,2	6,4	7,0	5,0	6,2
24,4	4,1	4,5	5,6	6,3	4,9	5,5
Орошаемый участок						
23,4	2,4	3,1	3,9	4,7	3,7	4,7
24,4	0,3	1,1	1,7	2,4	1,6	2,1

Эффективность применения того или иного критерия влагообеспеченности растения для управления орошением может характеризоваться урожаем сельскохозяйственных культур, полученным в условиях, когда необходимые поливы назначались по разным критериям влагообеспеченности.

Сравнительные данные о назначении полива по различным физиологическим показателям на примере кукурузы приводятся в табл. 7 [11].

Таблица 7

Урожай зерна кукурузы

Вариант опыта	Полив	Дата полива	Урожай, ц/га	Процент от контроля	Полив	Дата полива	Урожай, ц/га	Процент от контроля
	1-й опыт				2-й опыт			
Контроль								
Полив по обычному графику совхоза	1	9/VII	56	100	1	28/VI	58,4	100
	2	27/VII			2	14/VII		
	3	8/VIII			3	20/VIII		
	4	16/VIII			4	20/VIII		
Полив по признакам начала завядания листьев	1	15/VII	62,5	112	1	23/VI	67,2	115
	2	28/VII			2	17/VII		
	3	5/VIII			3	4/VIII		
	4	17/VIII			4	19/VIII		
Полив по концентрации клеточного сока	1	12/VII	69,6	124	1	23/VI	75,6	130
	2	24/VII			2	13/VII		
	3	31/VII			3	30/VII		
	4	14/VIII			4	13/VIII		

В данном случае в качестве контрольного принят вариант режима орошения по стандартному графику. Начало завядания определялось визуально по уменьшению тургора.

Из данных таблицы видно, что мотивированно назначенный полив повышает урожай, причем концентрация клеточного сока является более точным показателем влагообеспеченности, чем визуальная оценка тургора. Об этом свидетельствует значительный рост выхода продукции при режиме орошения с сигнализацией сроков полива по концентрации клеточного сока. Общее количество поливов при этом остается неизменным.

Несмотря на относительно небольшое увеличение урожая, полив по внешним признакам завядания представляет известный интерес вследствие очевидной простоты и оперативности его по сравнению с любым из методов диагностики состояния растений по концентрации клеточного сока. При этом очевидна также невозможность использования визуальных оценок влагообеспеченности

по признакам завядания растений для создания замкнутых систем автоматического полива и несовершенство подобных оценок, связанное с субъективностью восприятия признаков завядания.

Результаты аналогичного опыта для сахарной свеклы, в котором сравнивалась эффективность назначения поливов по внешним признакам и по влажности почвы, дают возможность оценить не только количественные, но и качественные характеристики урожая [4] (табл. 8).

Таблица 8

Эффективность полива при разных критериях оценки влагообеспеченности

(средние за три года показатели для сахарной свеклы)

Показатели	Полив назначался		
	по внешним признакам	при 70% ПВ	при 80% ПВ
Урожай сырых корнеплодов, ц/га	671	661	690
Содержание сахара в корнеплодах, %	15,6	15,8	15,6
Урожай сахара, ц/га	104,7	104,4	107,6
Средняя норма полива, м³/га	777	776	727
Оросительная норма, м³/га	2762	2582	2174
Потребление воды на единицу веса конечного продукта, м³/ц	70,7	68,0	74,3

По оценкам авторов работы [4], расхождение показателей сравниваемых вариантов опытов незначительно превышает возможные ошибки экспериментов.

Рассматривая данные двух последних таблиц, следует иметь в виду, что относительное увеличение урожая при обоснованном назначении полива не может рассматриваться как свидетельство оптимальности режима развития растений. Стандартные режимы полива, обоснованные средними многолетними условиями, по существу рассчитаны на недополучение части урожая из-за отклонения условий данного года от средних, а также из-за отклонений стандартного режима от оптимального.

В заключение приведем сводную таблицу физиологических методов, которые могут быть использованы для оценки влагообеспеченности растений (табл. 9). В таблице не приведены отдельные модификации измерительных методов, а оценка достоинств и недостатков рассмотренных показателей дается с позиций применения их для определения потребностей во влаге растений и сельскохозяйственных полей. В графе «Характеристика метода» дается приближенная оценка применения. Лабораторные методы могут использоваться для отдельных растений, выращиваемых

Таблица 9

Сводная таблица физиологических методов оценки влагообеспеченности растений

Метод или показатель	Характеристика метода	Область применения	Эксплуатационная характеристика	
			достоинства	недостатки
Транспирационный коэффициент или коэффициент влагообеспеченности растений	Лабораторная оценка параметров по результатам выращивания растений	Расчеты для прогнозов водопотребления растений	Возможность оценки интегрального водопотребления растениями или поля за большие промежутки времени	Большая изменчивость показателей по географическим районам, для разных сортов и т. п.
Весовой метод определения транспирации живых растений	Лабораторные измерения для отдельного растения в вегетационном сосуде	Исследования интенсивности фотосинтеза или влагообеспеченности растений	а. Высокая точность измерений. б. Электрический сигнал на выходе устройства. в. Возможность управления поливом	Сложная специальная аппаратура. Невозможность экстраполяции результатов измерений для полевых условий
Определение транспирации методом среза	Лабораторно-полевые измерения	Исследования влагообмена в полевых условиях на больших массивах растений	Простота реализации	Метод требует уничтожения элементов растений. Большая изменчивость показателей в пределах одного поля
Определение транспирации методом изоляции растений	Лабораторные или лабораторно-полевые измерения	Исследования влагообмена в лабораторных или полевых условиях	Возможность точных измерений в полевых условиях	Сложная специальная аппаратура. Невозможность экстраполяции данных единичного растения на весь массив поля
Перепад влажности воздуха между листом и средой. Перепад температуры между листом и воздухом	Лабораторные или полевые измерения	Исследования влагообеспеченности растения. Управление поливом в лабораторных условиях	а. Дистанционные измерения. б. Электрический сигнал на выходе устройства. в. Возможность управления поливом	Косвенные измерения относительных измерений транспирации. Невозможность оценки водопотребления

Метод или показатель	Характеристика метода	Область применения	Эксплуатационная характеристика	
			достоинства	недостатки
Определение концентрации клеточного сока методами химического анализа	Лабораторно-полевые измерения	Диагностика состояния растений при исследованиях влагообмена	Высокая чувствительность измеряемых параметров к внешним воздействиям	Сложность измерений. Большая длительность единичного измерения. Большая изменчивость показателей в пределах одного растения и поля в целом
Определение концентрации клеточного сока или сосущей силы листа методами обмена жидкостью или паром	Лабораторно-полевые измерения	Диагностика состояния растений при исследованиях влагообмена	Высокая чувствительность измеряемых параметров к внешним воздействиям	Сложность измерений. Большая длительность единичного измерения. Большая изменчивость показателей в пределах одного растения и поля в целом
Электрическое сопротивление тканей растения	Лабораторные или полевые измерения	Диагностика состояния растений при исследованиях влагообмена	а. Дистанционность измерений б. Электрический сигнал на выходе устройства	Косвенные измерения комплекса параметров, связанных с состоянием растений и концентрацией клеточного сока. Большая изменчивость показателей в пределах одного растения и поля в целом
Оценка тургора методом сушки и взвешивания	Лабораторно-полевые измерения	Оценки влагообеспеченности	Простота реализации	Большая длительность измерений. Косвенные измерения вторичных показателей влагообеспеченности
Визуальные оценки тургора	Полевые	Оценки влагообеспеченности поля	а. Простота реализации методики.	Малая точность. Отсутствие четких критериев

			б. Удобство применения для больших массивов	влагообеспеченности поля
Оценка тургора по степени раскрытия устьиц	Лабораторно-полевые или лабораторные	Оценка влагообеспеченности	Относительно высокая точность	Сложность и большая длительность измерений. Отсутствие точных критериев влагообеспеченности
Оценка тургора тензометрическим методом	Лабораторные	Оценка влагообеспеченности растения	а. Дистанционные измерения. б. Электрический сигнал на выходе устройства	Большая изменчивость показателей в пределах одного растения
Определение скорости движения сока на срезанном растении	Полевые	Специальные физиологические исследования		Метод требует уничтожения растений. Большая изменчивость показателей в пределах поля
Определение скорости движения сока на живом растении	Лабораторные	Специальные физиологические исследования. Оценка влагообеспеченности растения	а. Дистанционные измерения. б. Электрический сигнал на выходе устройства	Косвенные относительные измерения. Отсутствие точных критериев влагообеспеченности растения. Невозможность прямой градуировки датчиков
Оценка развития растений по биометрическим показателям	Полевые	Измерения интенсивности фотосинтеза. Оценка влагообеспеченности	Возможность интегральной оценки влияния внешних факторов на развитие растений	Большая изменчивость показателей в пределах поля. Сложность разделения влияния различных факторов
Оценка развития растений по изменению объема зеленой массы радиоактивным методом	Полевые	Измерения интенсивности фотосинтеза. Оценка влагообеспеченности поля	а. Возможность интегральной оценки влияния внешних факторов на развитие растений. б. Дистанционные измерения. в. Электрический сигнал на выходе устройства	Сложность разделения влияния различных факторов

в условиях лаборатории. Лабораторно-полевые методы применяются для измерений в полевых условиях, но требуют обработки образцов или проб в лаборатории или установки сложной аппаратуры вблизи места измерений. Полевые методы позволяют определять искомые показатели при камеральной расчетной обработке данных измерений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Алпатьев А. М. Влагооборот культурных растений. Гидрометеоиздат. Л., 1954.
2. Алпатьев А. М. О биоклиматической классификации растений по требованию к воде. Метеорология и гидрология, № 2, 1967.
3. Биологические основы орошаемого земледелия. Сб. статей. Изд. АН СССР, М., 1957.
4. Биологические основы орошаемого земледелия. Сб. статей. Изд. «Наука», М., 1966.
5. Будаговский А. И. Испарение почвенной влаги. Изд. «Наука», М., 1964.
6. Будыко М. И. К теории влияния климатических факторов на фотосинтез. ДАН СССР, 158, 2, 1964.
7. Вартанян Г. В. Определение некоторых параметров биологических объектов методом электрического сопротивления. Сб. статей: «Измерительная техника в сельском хозяйстве». ОНТИприбор, М., 1967.
8. Влияние метеорологических факторов на фотосинтез и тепловой режим растительного покрова. Тр. ГГО, вып. 229, 1968.
9. Водный режим растений в засушливых районах СССР. Сб. статей. Изд. АН СССР М., 1961.
10. Генкель П. А. Физиология растений с основами микробиологии. Учпедгиз, М., 1962.
11. Горюнов Н. С., Петрунин В. М. Диагностирование сроков полива кукурузы по физиологическим показателям. Физиология растений, т. 13, № 2, 1966.
12. Ермаков Е. И., Дегтярев П. А., Владимиров В. Е. Установка для автоматической регистрации роста, движений и водного обмена растений. Тр. АФИ, вып. 16, 1968.
13. Иванов Л. А. О методе определения транспирации на срезанных побегах. Ботанический журнал, т. 41, № 2, 1956.
14. Каганов М. А., Карманов В. Г., Рябова Е. П. Прибор для измерения абсолютной и относительной влажности воздуха и температуры в небольших объемах. Тр. АФИ, вып. 16, 1968.
15. Карманов В. Г., Рябова Е. П. Прибор для регистрации относительных изменений скорости водного потока по растению. Тр. АФИ, вып. 16, 1968.
16. Карманов В. Г. Влияние мощности светового потока на температуру воздуха и температуру листа растения. ДАН СССР, 77, 5, 1951.
17. Козловский Т. Водный обмен растений. Пер. с англ. под ред. Н. С. Петинова. Изд. «Колос», М., 1969.
18. Нечипорович А. А. Фотосинтез и теория получения высоких урожаев. Изд. АН СССР, М., 1956.
19. Пенман Х. Л. Растения и влага. Гидрометеоиздат, Л., 1968.
20. Петинов Н. С. Физиология орошаемой пшеницы. Изд. АН СССР, М., 1959.
21. Петинов Н. С. Физиология орошаемых сельскохозяйственных растений. Тимирязевские чтения, т. XIV. Изд. АН СССР, М., 1962.

22. Прокофьев А. А. Новый метод определения транспирации растений. Физиология растений, 8, 5, 1961.
23. Роде А. А. Основы учения о почвенной влаге, т. I. Гидрометеоиздат, Л., 1965.
24. Слейтер Р., Макилрой И. Практическая микроклиматология. Пер. с англ. под ред. С. А. Веригo и С. А. Сапожниковой. Изд. «Прогресс», М., 1964.
25. Сказкин Ф. Д. Влияние избыточного увлажнения почвы на растения в различные периоды развития. Физиология растений, 7, 3, 1960.
26. Степанов Л. Н. Метод и устройство для определения тургорного давления. Вестник с/х науки, № 3, 1969.
27. Филиппов Л. А. Методика оценки влияния температуры и влажности воздуха на водный режим чайного растения. Физиология растений, 15, 6, 1968.
28. Физика растений и внешние условия. Тр. АФИ, вып. 12, 1965.
29. Чудновский А. Ф., Карманов В. Г., Савин В. Н., Рябова Е. П. Кибернетика в сельском хозяйстве. Изд. «Колос», Л., 1965.
30. Шардаков В. С. Определение сроков полива хлопчатника по величине сосущей силы листьев. Изд. АН УзССР, 1956.

Глава II

ФИЗИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ НАЛИЧИЯ ДОСТУПНОЙ РАСТЕНИЮ ПОЧВЕННОЙ ВЛАГИ

§ 1. Влага в почве

С физической точки зрения почва может рассматриваться как сложная многофазная дисперсная система. Элементы, составляющие систему, находятся в твердом, жидком и газообразном состоянии. В данном разделе мы, не вдаваясь в анализ сложного комплекса физико-химических процессов, обусловливающих изменение почвенных характеристик, остановимся вкратце на основных формах существования влаги в почве.

В соответствии с общепринятой моделью реальная почва может рассматриваться как смесь почвенных частиц — агрегатов разного размера. Более крупные агрегаты возникают при соединении более мелких, образованных из микроагрегатов. Микроагрегаты в свою очередь создаются из первичных минеральных частиц. При формировании почвенной структуры существенную роль играет гранулометрический состав первичных минеральных элементов, а также количество и состав органического вещества.

В соответствии с принятой моделью почва представляет собой сложную пористую систему с иерархией пор. Наиболее мелкие поры образуются между первичными частицами. Следующая ступень — микропоры, они создаются при упаковке микроагрегатов в промежуточные по размерам комплексы и т. д. По мере роста агрегата увеличивается и размер пор, образуемых при включении этого агрегата в более сложную систему. Общая пористость, так же как и распределение пор по размерам, может быть оценена с помощью специальных измерений.

Так как в зависимости от размера капилляра (поры) меняется сила, удерживающая в нем жидкость, очевидно, что для извлечения влаги из капилляров необходимо затратить некоторую работу. Поэтому при своих ограниченных энергетических ресурсах растение не может извлечь из почвы всю влагу.

Это относится к «свободной» влаге. Помимо нее, в составе реальных почв находится обычно значительное количество «связан-

ной» воды. Такое деление в известной степени условно, так как свободная влага отличается от связанной, находящейся в более мелких капиллярах, в основном величиной энергии связи, хотя имеются данные, что значения ряда физических констант у связанной воды несколько иные (плотность 1,2—1,6 г/см^3, точка замерзания — до —70° С, удельная электропроводность 10^{-14} ом$^{-1}$ см$^{-1}$ и т. д.).

Связанная влага существует, кроме того, в виде гидратных комплексов сорбционных пленок толщиной в несколько молекулярных слоев. Помимо этого, связанная влага в почве находится в виде кристаллизационной воды минералов, составляющих скелет почвы, а также как элемент органических веществ присутствующих в почве.

В зависимости от выбранного метода измерения влажности могут определяться различные сочетания упоминавшихся форм влаги, и для правильной оценки количества доступной влаги эти особенности распределения влаги должны учитываться.

В настоящее время приняты следующие основные константы влагосодержания почвы.

Количество влаги, которое почва способна удерживать в воздушно-сухом состоянии, называется гигроскопической влажностью, или гигроскопичностью, и выражается в процентах к весу абсолютно сухой почвы. При изменении влажности среды, в которой находится почвенный образец, величина гигроскопичности также меняется.

Наибольшее количество воды, которое почва способна поглотить из атмосферы, насыщенной парами воды, называется максимальной гигроскопической влажностью, или максимальной гигроскопичностью. Величина максимальной гигроскопичности определяется в опытах, при реализации которых проба почвы помещается в эксикатор над раствором кислоты известной концентрации. В различных методиках определения этого параметра относительная влажность воздуха в эксикаторе выбирается равной 94, 96 или 98%.

Оба эти параметра зависят от дисперсности и удельной поверхности почвы. Максимальная гигроскопичность в реальных почвах колеблется от 2 до 15% и превышает гигроскопическую влажность почвы не более чем в два раза.

Влажность почвы, при которой наблюдается устойчивая потеря тургора произрастающими растениями, называется влажностью устойчивого завядания. При таких условиях содержащаяся в почве влага становится недоступной растению, так как энергия связи ее слишком велика. В растениях при таких условиях начинаются необратимые процессы, связанные с обезвоживанием растительных тканей. Влажность устойчивого завядания определяется в опытах с растениями. Она зависит от типа растительности и типа почвы. Обычно влажность устойчивого завядания в 1,5—2 раза больше максимальной гигроскопичности.

Наибольшее количество воды, которое почва способна длительно удерживать после обильного увлажнения и свободного стекания

влаги, называется полевой влагоемкостью почвы. Иногда применяется также такой параметр, как полная влагоемкость почвы. Под этим понятием подразумевают влажность, при которой влага заполняет все поры и вытесняет весь воздух из почвенного образца.

Методы оценки влагообеспеченности растений по параметрам почвенной влаги широко используются в настоящее время. Принято считать, что оптимальной для растения является влажность почвы в интервале 60—100% полевой влагоемкости, что подтверждается экспериментальными данными при выращивании сельскохозяйственных растений в контролируемых условиях (в вегетационных опытах и в поле). В большинстве подобных экспериментов определение влажности почвы используется как эталонный контрольный метод.

В практике орошения в последнее время распространяется еще один параметр — влажность замедления роста, под которым обычно понимают нижний предел оптимальной влажности почвы. Наличие этого параметра объективно отражает факт различной доступности для растений влаги с разной энергией связи. Обычно влажность замедления роста составляет 60—70% полевой влагоемкости. Если влажность ниже этого уровня, то, несмотря на отсутствие внешних признаков, растения ощущают угнетение и снижают накопление зеленой массы и урожай, как это отмечалось в главе I.

При определении полной влагоемкости влага непрерывно подается в образец. После прекращения поступления воды ее избыток начинает стекать, постепенно освобождая макропоры между крупными агрегатами почвы, вплоть до достижения полевой влагоемкости. В состоянии полевой влагоемкости макропоры почвы свободны от воды, которая сохраняется в этом случае в виде кольцевых менисков (манжет) вокруг точек соприкосновения агрегатов. В манжетах вода удерживается капиллярными силами.

Благодаря манжетам образуется единая система, в которой вода может перемещаться между агрегатами, перетекая по манжетам и капиллярам внутри мениска. Естественно, что в этом случае влага наиболее доступна растению и может быть получена им при минимальном расходе энергии. По мере иссушения почвы количество воды в манжетах уменьшается и наступает влажность замедления роста, при которой свободная влага манжет уже использована, а начинает расходоваться влага, концентрированная внутри макроагрегатов в капиллярах значительно меньшего диаметра, чем манжеты. Иногда этот параметр называют влажностью разрыва капилляров, что не вполне точно. При влажности ниже уровня замедления роста энергия связи воды увеличивается, и потребление влаги при фиксированной сосущей силе корней оказывается лимитированным, что и приводит к частичному нарушению физиологических функций растения.

Доля заполненного водой объема почвы в равновесном состоянии зависит от давления воды в почве. По значению этого параметра может быть охарактеризована водоудерживающая способ-

ность и гидравлическая проводимость различных почв. Максимальная сосущая сила корней в условиях нормальной влагообеспеченности должна превышать силу общего натяжения воды в почве. При этом потребление влаги регулируется растением в зависимости от потребности. Критическое максимальное значение сосущей силы корней определяется видом растения и фазой развития. Оно обычно лежит в пределах 10—20 атмосфер. Если натяжение влаги в почве выше этого критического значения, то растение не способно отбирать влагу от почвы и значение влажности соответствует параметру устойчивого завядания. Условно принято, что влажности устойчивого завядания соответствует натяжение почвенной влаги около 16 атм.

По существу натяжение почвенной влаги является прямым и абсолютным параметром влагообеспеченности растений в собственном смысле слова. По значению критической сосущей силы корней и фактическому натяжению влаги в почве можно оценить дефицит влаги, сроки и нормы полива и т. п. С этой точки зрения даже влажность почвы является в какой-то степени косвенным параметром, так как для определения количества доступной растению влаги информацию о влажности почвы необходимо сопоставить с влажностью завядания и полевой влагоемкостью почвы на данном поле.

В исследованиях многофазной смеси вода—почва для количественной оценки энергетических взаимодействий используются параметры типа потенциала влаги и свободной энергии влаги в почве [7, 17, 28]. Эти параметры могут быть применены также и к процессам взаимодействия влаги в растении и к характеристике всей системы транспорта влаги в почве—растении—воздухе. Пример такого использования термодинамических характеристик приведен на рис. 1, где дано распределение потенциала влаги в элементах растения и на границах почва—растение и растение—атмосфера.

По аналогии с механикой и теорией электричества под потенциалом влаги в данном случае понимают работу, которую необходимо произвести против внешних сил для того, чтобы перенести единицу массы воды из объема свободной воды в точку, потенциал которой рассматривается. За опорный уровень нулевого потенциала при этом принимается состояние чистой свободной воды.

Полный потенциал почвенной влаги φ может быть определен как сумма составляющих его частных потенциалов:

$$\varphi = \psi + \lambda + \omega. \qquad \text{(II.1)}$$

Капиллярный потенциал ψ, или потенциал давления, возникает потому, что вода находится под внешним давлением или натяжением (в зависимости от знака сил поверхностного натяжения). Потенциал давления по существу эквивалентен работе сжатия или растяжения воды. Для почвы эта составляющая потенциала обусловлена силами поверхностного натяжения, и иногда для ее обозначения используется термин «капиллярный потенциал». При

рассмотрении влаги в листе этой составляющей соответствует тургорное давление, вызываемое упругими свойствами клеточных оболочек.

Осмотический потенциал λ влага имеет благодаря присутствию в ней растворенных веществ. Значение его определяется изменением энергии молекулы воды в растворе по сравнению с энергией в чистой дистиллированной воде.

Третья составляющая ω — гравитационный потенциал — возникает вследствие гравитационного поля земли. В эту составляющую включаются и другие потенциалы, обусловленные взаимодействием влаги и вещества, в частности действием поля адсорбционных сил.

Анализ процессов взаимодействия показывает, что применение понятий потенциалов влаги удобно и возможно при исследованиях взаимодействий жидкой фазы с твердым телом при постоянной температуре. При этом полный потенциал влаги определяется по отношению к чистой воде при той же температуре.

В случае анализа процессов при переменной температуре или при рассмотрении трехфазных систем типа почва—вода—пар применяются более представительные параметры взаимодействия, более полно отражающие энергетическое состояние почвенной влаги и его изменение. Аналогичные функции, используемые в термодинамике и физической химии, называют удельной свободной энергией или термодинамическим потенциалом.

Термодинамический потенциал отсчитывается от определенного выбранного уровня, принимаемого за нулевой. Имеет смысл только разность потенциалов, но не абсолютное значение его. Соответственно для удельной свободной энергии имеет смысл только изменение этой величины, под которой понимают свободную энергию единицы массы.

При наличии равновесия нескольких фазовых состояний вещества (например, солевой раствор+лед+пар) удельная свободная энергия, или термодинамический потенциал вещества, во всех состояниях одинакова, что весьма удобно при анализе многофазных систем.

Изменение полной удельной свободной энергии Δf может быть представлено в виде суммы составляющих ее элементов

$$\Delta f = \Delta f_\sigma + \Delta f_A + \Delta f_O + \Delta f_p. \qquad \text{(II.2)}$$

Здесь Δf_σ — изменение удельной свободной энергии под действием сил поверхностного натяжения; Δf_A — изменение удельной свободной энергии, связанное с пребыванием воды в поле адсорбционных сил, окружающих частицы почвы; Δf_O — изменение удельной свободной энергии, зависящее от присутствия в воде растворенных веществ, создающих осмотическое давление; Δf_p — изменение удельной свободной энергии под действием сил гидростатического давления.

Следует отметить, что, хотя термодинамическая терминология в последнее время распространена широко, многие авторы при-

дают специфический смысл отдельным терминам, так как единых узаконенных толкований терминов по существу нет.

Практически общее натяжение влаги в почве, или полный потенциал влаги, отражает фактическое состояние воды и определяется как сумма натяжения почвенной влаги (капиллярного потенциала, сосущей силы почвы) и осмотического давления почвенного раствора. Гравитационную составляющую обычно не учитывают. Потенциал влаги измеряют в единицах давления. Иногда для этого параметра применяют такое же обозначение, как и для капиллярного потенциала, pF, причем численное значение определяют как логарифм натяжения влаги (выраженного в сантиметрах водяного столба).

Удельная свободная энергия измеряется в общепринятых единицах (эрг/г и т. п.).

Растворенные в воде соли фактически не изменяют влажности почвы, но заметно влияют на полный потенциал влаги в почве. При изменении осмотических соотношений между почвенным раствором и клеточным соком почвенная влага может стать недоступной для растения даже при значительной влажности почвы. Эти изменения доступности влаги могут быть зафиксированы при измерениях полного потенциала или удельной свободной энергии влаги в почве.

Для характеристики роли растворенных веществ и их влияния на полный потенциал влаги используется такой параметр, как осмотическое давление почвенного раствора, зависящее как от степени диссоциации, так и от концентрации солей в растворе и от температуры.

§ 2. Параметры, связанные с доступностью почвенной влаги

Общее натяжение влаги в почве (потенциал влаги) возникает под действием как капиллярных сил, так и осмотического давления почвенного раствора, причем оба эти фактора могут учитываться и измеряться независимо.

Принципиально возможно также измерение таких параметров, связанных с влагосодержанием почвы, в которых проявляется совместное действие обоих факторов. Например, давление водяного пара в почвенном воздухе, по которому может быть определен термодинамический потенциал влаги в системе.

Условие равновесия на переходе между жидкостью и паром может быть определено как равенство термодинамических потенциалов $\mu_ж = \mu_п$ и температур в обеих фазах среды. Для изотермических условий и постоянства гравитационного потенциала в жидкости и паре это условие можно записать в дифференциальной форме:

$$d\mu = v\,dp, \qquad (II.3)$$

где μ — термодинамический потенциал, v — удельный объем, p — давление; индексы указывают на параметры жидкости и пара.

При выполнении условия равновесия $d\mu_{ж} = d\mu_{п}$ получается

$$v_{ж}\, dp_{ж} = v_{п}\, dp_{п}; \tag{II.4}$$

здесь $p_{ж}$ и $p_{п}$ — давления в жидкости и в газовой фазе, $v_{ж} = \frac{M_{ж}}{\rho_{ж}}$ и $v_{п} = \frac{RT}{\rho_{п}}$ — соответствующие удельные объемы жидкости и газа; R — газовая постоянная, M — масса грамм-молекулы; $\rho_{ж}$ — плотность жидкости.

В случае возникновения на межфазной границе перепада давления (за счет искривления поверхности жидкости) условие сохранения равновесия на границе может быть записано в виде

$$\Delta p_{ж} = \frac{RT\rho_{ж}}{M_{ж}} \int_{p_0}^{p} \frac{dp_{п}}{p_{п}}, \tag{II.5}$$

где p_0 — равновесное давление над плоской поверхностью жидкости, p — равновесное давление над искривленной поверхностью или тонкой пленкой жидкости.

После интегрирования и преобразования можно получить

$$\frac{p}{p_0} = \exp\left(\frac{M}{RT\rho_{ж}} \Delta p_{ж}\right). \tag{II.6}$$

Если концентрация растворенных в жидкости веществ не учитывается, то $\Delta p_{ж}$ определяется кривизной поверхности мениска. В окончательной форме можно записать

$$\frac{p}{p_0} = \exp\left(-\frac{M}{RT\rho_{ж}} P\right); \tag{II.7}$$

здесь P — расклинивающее давление в слое влаги.

Аналогичным выводом можно получить и изменение относительного давления пара в зависимости от концентрации c растворенных веществ. Изменение химического потенциала $\Delta\mu_{ж}$ в этом случае

$$\Delta\mu_{ж} = -(c_2 - c_1)\, RT. \tag{II.8}$$

Под c понимается отношение между числом молекул растворенного вещества и растворителя. При этом $c_2 > c_1$. Так как $\Delta\mu_{ж} = v_{ж}\Delta p_{ж}$, то

$$\Delta p_{ж} = -\frac{c_2 - c_1}{v_{ж}} RT. \tag{II.9}$$

Если учесть, что осмотическое давление $\Delta p_{осм} = \frac{c_2 - c_1}{v_{ж}} RT$, то $\Delta p_{ж} = -\Delta p_{осм}$. Отсюда можно получить формулу для относительного давления пара

$$\frac{p}{p_0} = \exp\left(-\frac{M_{ж}}{RT\rho_{ж}} \Delta p_{осм}\right). \tag{II.10}$$

Суммарное действие обоих факторов, воздействующих на значение потенциала влаги в почве, как видно из структуры формул (II.7) и (II.10), можно определить, измеряя упругость паров воды в почвенном воздухе в строго контролируемых изотермических условиях, обеспечивающих постоянство p_0 и других параметров, входящих в формулы.

Принципиально возможно для определения потенциалов влаги использование фазового перехода плавление—отвердевание, но в этом случае фактические данные значительно хуже поддаются интерпретации, хотя измерительные методы определения точки замерзания значительно проще.

Одним из существенных элементов потенциала влаги в почве является сосущая сила почвы, обусловленная чисто физическими механизмами капиллярной сорбции. Сосущая сила в некоторых слу-

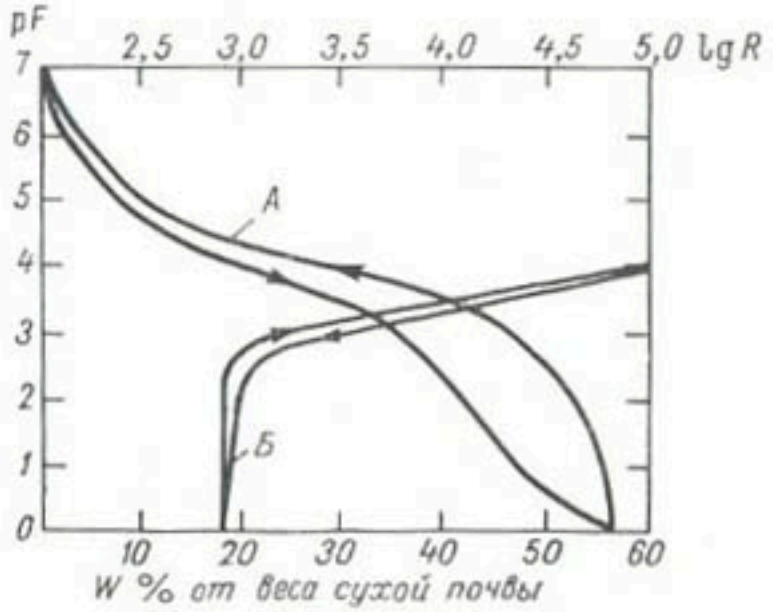


Рис. 14. Зависимость между сосущей силой pF, влагосодержанием W для почвы A и сопротивлением R гипсового блока $Б$.

чаях может прямо использоваться для определения влагообеспеченности растения. А этот параметр, как указывалось выше, может интерпретироваться как давление в столбе влаги для капилляра, эквивалентного почвенной системе.

Прямые измерения сосущей силы почвы возможны только при использовании методов, для реализации которых в контакт с почвой вводится пористое тело. Влага этого пористого тела должна находиться в равновесии с почвенной влагой. Непосредственный отсчет давления производится по воде (тензиометры) или по воздуху (методы прессов). Эти методы по существу лабораторные и непосредственно в поле, как правило, не используются.

Косвенная оценка сосущей силы используется для измерений пористых блоков. В таком блоке устанавливается равновесная влажность, определяемая соотношением между фактической сосущей силой почвы и блока. Измерение влажности пористого блока производится по любому физическому параметру, связанному с влажностью почвы. В качестве примера можно привести зависимость электрического сопротивления гипсового блока от сосущей силы почвы. Гипсовые блоки обладают буферным действием

и нейтрализуют влияние солей. Их сопротивление практически не зависит от концентрации почвенного раствора. В то же время из рис. 14 видно, что область чувствительности гипсового блока ограничена $pF = 2{,}5 \div 4$, что приблизительно соответствует зоне сосущей силы растения. Таким образом, гипсовый блок является удовлетворительным датчиком доступной растению влаги, но не обеспечивает определения потенциала влаги во всем диапазоне измерений, необходимом при исследованиях влаги в почве.

Как уже отмечалось выше, влагообеспеченность наиболее полно может характеризоваться потенциалом почвенной влаги, определяющим доступность влаги для органов растений. Параметры сосущей силы почвы, не отражающие влияния солей на доступность влаги, не могут обеспечить достаточно полную информацию о влагообеспеченности растений в данных условиях. Еще менее характерны интегральные измерения влагосодержания почвы. При этом для полной характеристики условий требуется учет не только концентрации раствора, но и водных констант почвы, связанных со структурными особенностями образца (сравнение фактического влагосодержания почвы со шкалой).

§ 3. Методы определения потенциала влаги в почве

Потенциал влаги в почве, однозначно определяющий доступность воды для растений, может быть определен экспериментально [7]. Оценка влагообеспеченности растений, как уже отмечалось, может быть произведена по параметрам типа термодинамического потенциала почвенной влаги, обусловленным не только характеристиками связи капиллярной влаги, но и осмотическими показателями почвенного раствора. Измерение полного потенциала влаги может быть осуществлено криоскопическим и психрометрическим методами.

Криоскопический метод основан на зависимости температуры кристаллизации воды от давления и наличия растворенных веществ. Процесс измерения при этом сводится к относительно медленному охлаждению и непрерывной индикации температуры почвенного образца. Как известно, в момент кристаллизации снижение температуры прекращается до завершения отвердевания данной фазы расплава (в данном случае части влаги, которая характеризуется определенной энергией связи). Обрабатывая материалы по изменению температуры почвы при охлаждении, можно определить гидрофизические константы почвы и фактический потенциал влаги в единицах давления, воздействующего на эту влагу.

Точность криоскопического метода относительно невысокая, а его экспериментальная реализация связана с некоторыми трудностями (высокие требования к равномерности охлаждения образца, необходимость приведения полученных данных к нормальным температурным условиям и т. п.).

Психрометрический метод базируется на том, что при наличии многофазной системы термодинамический потенциал влаги во всех

фазах одинаков. Практически это позволяет заменить сложные измерения потенциалов в жидкой фазе относительно более простыми измерениями потенциала влаги в газовой фазе, находящейся в равновесии с почвенным образцом. Такие измерения легко реализовать по упругости паров воды. Основная трудность применения подобных методов связана с тем, что измерения упругости пара должны производиться с большой точностью и в достаточно узком диапазоне влажности воздуха вблизи точки насыщения. Ранее отмечалось, что максимальная гигроскопическая влажность почвы экспериментально определяется при сорбции влаги почвой из воздуха в условиях постоянной относительной влажности воздуха 94%. Таким образом, весь диапазон влажности почвы от максимальной гигроскопической до полевой влагоемкости соответствует изменению упругости паров воды в воздухе в пределах 6% относительной влажности вблизи насыщения. Из этого вытекают требования точности отсчета температуры по смоченному и сухому термометрам психрометра, а также необходимость прецизионного термостатирования образцов при измерениях, так как погрешности термостатирования делают невозможным осуществление самих измерений влажности в этом диапазоне.

В практике исследований психрометрический метод используется в двух вариантах [3, 4, 7, 25]. В любом случае образец почвы помещают в специальный бюкс и выдерживают до установления равновесия по влаге между почвой и воздухом. Как уже отмечалось, процесс измерений производится в термостате. Далее осуществляется измерение влажности воздуха специальными микропсихрометрами. Варианты методики различаются способом увлажнения измерителя температуры, в качестве которого используется обычно термопара (иногда полупроводниковый терморезистор).

В одном случае термопара устанавливается в бюксе после завершения подготовки пробы почвы. Непосредственно перед установкой спай термопары смачивается водой (рис. 15 *а*), а сразу же после установки производится измерение температуры смоченного термометра. Для удобства смачивания на спае смонтировано маленькое кольцо, в котором капля воды может находиться достаточное время для осуществления процесса измерения. После высыхания капли воды та же термопара используется для измерения температуры непосредственно в бюксе.

Во втором варианте психрометра (рис. 15 *б*) термопару смачивают непосредственно в бюксе. Для этой цели используют эффект Пельтье. Термопару устанавливают в бюксе с начала опыта. После выдержки в термостате и установления равновесия между воздухом и почвой через термопару пропускают ток. В соответствии с эффектом Пельтье при пропускании через термопару постоянного тока один из спаев начинает нагреваться, а другой охлаждаться. Направление тока выбирают таким образом, чтобы охлаждался спай термопары, помещенный в бюкс. При этом на охлаждающемся спае конденсируется влага. Затем источник тока отключают

от термопары и подключают к ней измеритель. Слой конденсата на спае обеспечивает смачивание, и термопара измеряет температуру смоченного термометра психрометра. Психрометры градуируются в эксикаторах по серии растворов с известной упругостью паров.

Потенциал влаги (в сантиметрах водяного столба) по данным измерений психрометров может быть рассчитан по формуле

$$\Delta\mu = 3{,}18 \cdot 10^6 \lg r,$$

где r — относительная влажность воздуха.

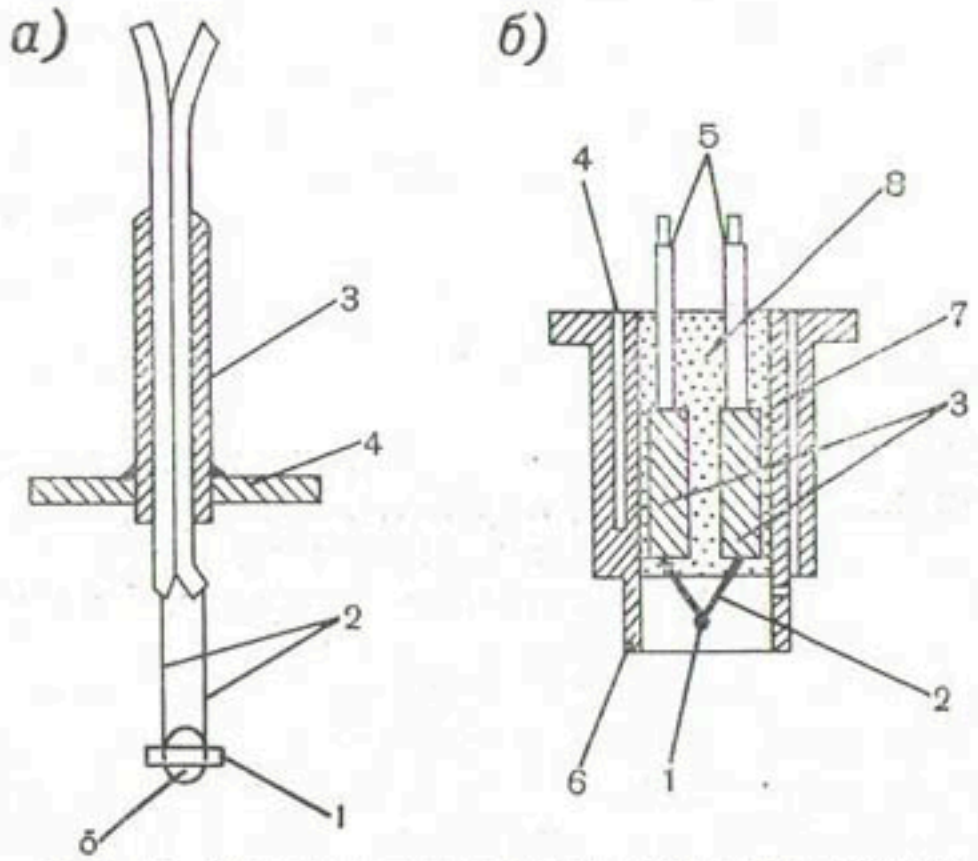


Рис. 15. Термопарные психрометрические датчики для определения потенциала влаги в почве по относительному давлению паров воды в воздухе.

а — психрометр с принудительным смачиванием: *1* — серебряное кольцо, *2* — термопара, *3* — втулка, *4* — опорная шайба, *5* — капля воды; *б* — психрометр с автоматическим смачиванием, использующий эффект Пельтье: *1* — спай термопары, *2* — провода термопары, *3* — медные теплоаккумуляторы, *4* — отверстие для терморезистора, *5* — выводы термопары, *6* — защитное кольцо, *7* — втулка, *8* — полимерная смола.

По данным Ричардса, психрометрический метод дает возможность измерять относительное давление водяного пара (относительную влажность воздуха) с точностью $\pm 0{,}002\%$.

Психрометр, использующий эффект Пельтье, имеет меньший диапазон измеряемых давлений (по сравнению с прибором непосредственного увлажнения), так как для него нижний предел давления определяется минимальной температурой охлажденного термоспая. Для обычно используемых термопар термоэлектрическая эффективность низка и соответственно мал максимальный перепад температуры между средой и охлаждающимся спаем.

Все эти методы определения полного потенциала влаги по существу являются лабораторными, они непригодны для применения в полевых условиях. Особенно это относится к психрометрическому методу (для обеспечения необходимой точности измерений в этом случае требуется термостатирование образца в пределах $\pm 0{,}001^\circ$ С).

В практике исследований большое распространение получили методы раздельного определения элементов потенциала влаги.

Для измерений капиллярного потенциала, представляющего обычно основную компоненту натяжения влаги в почве, применяется несколько типов приборов с пористыми мембранами и пластинами [23, 35, 36].

Лабораторные приборы для исследований энергии связи влаги на почвенных образцах (вакуум-капилляриметры, пресс-пластины, мембранные прессы) построены по одной принципиальной схеме (рис. 16). Образец почвы размещается на микропористой пластине или мембране. За счет вакуума с нижней стороны пластины или

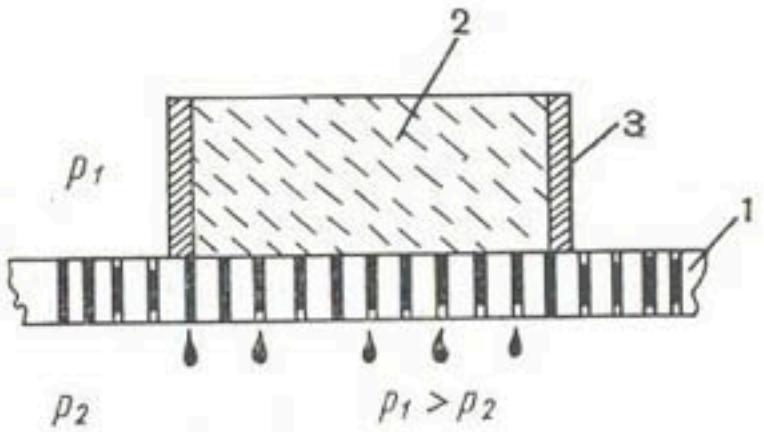


Рис. 16. Схема устройства прибора с камерой давления (или вакуума) для измерения давления почвенной влаги.

1 — пластина (или мембрана) из микропористого материала, *2* — почвенный образец, *3* — фиксирующее кольцо; p_1 — давление воздуха в камере высокого давления, p_2 — давление воздуха в камере низкого давления.

нагнетания воздуха создается перепад давления, вызывающий вытеснение влаги из образца, количество которой измеряется. Меняя перепад давлений в пределах соответствующих энергий связи влаги в почве, с помощью подобных приборов получают зависимости между капиллярным потенциалом и влажностью почвы. Каждый из приборов этой группы имеет ограниченный диапазон и свою область максимальной чувствительности, но весь комплекс приборов может обеспечить измерения во всем необходимом диапазоне энергий связи влаги.

Имеются данные, указывающие на наличие у приборов этого типа заметных погрешностей, связанных с «защемленными» в почве пузырьками воздуха. Отсчет по прибору, как правило, превышает фактическое давление, эквивалентное энергии связи.

В лабораторных исследованиях, связанных с измерениями энергии связи влаги, применяется также центрифугирование. По основному принципу действия этот метод аналогичен методу прессов, при котором внешним давлением из образца почвы удаляется вода. В данном случае образец почвы подвергается воздействию центробежной силы в скоростной центрифуге. Под действием этой силы часть влаги удаляется из образца. Почва при этом размещается в специальном стакане с сетчатым дном. Эквивалентное

давление H, создаваемое центробежным силовым полем, может быть рассчитано по формуле

$$H = \frac{hR}{2}\left(\frac{N}{300}\right)^2;$$

здесь N — число оборотов центрифуги в минуту, R — радиус вращения образца (до середины слоя почвы в стаканчике), h — высота слоя почвы в стаканчике.

Помимо лабораторной аппаратуры, при исследованиях применяются также и универсальные приборы — тензиометры, пригодные для использования в полевых условиях.

Принципиальная схема тензиометра приведена на рис. 17. Основной рабочий элемент тензиометра — пористая пластина или трубка, помещаемая в почве. Гидравлическая система, заполненная

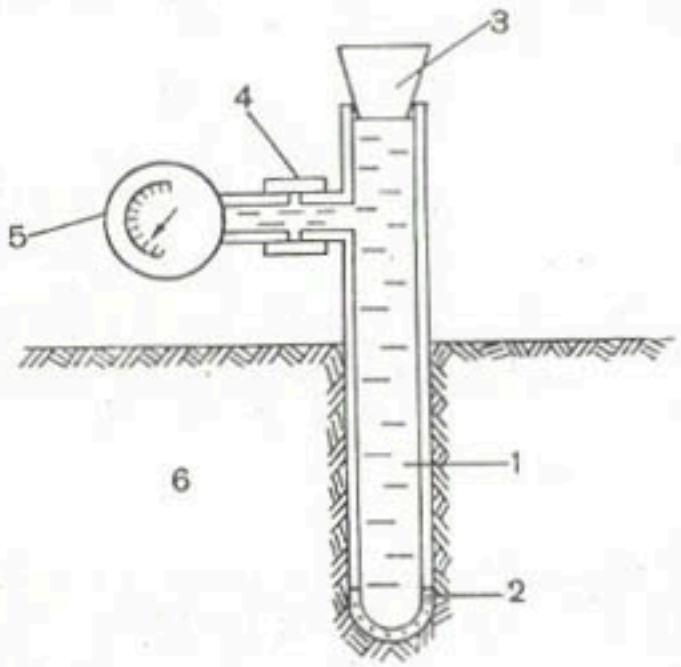


Рис. 17. Схема устройства тензиометра.

1 — трубка с водой, *2* — пористый наконечник или мембрана, *3* — пробка (или кран) для долива воды и удаления воздуха, *4* — золотниковое соединение, *5* — вакуумметр, *6* — почва.

чистой водой, соединяет пористый элемент с манометром. После установки и заливки датчика ненасыщенная влагой почва отсасывает воду через пористый элемент до тех пор, пока отрицательное давление (вакуум) в трубке не уравняет сосущую силу почвы. Отсчет давления в гидравлической системе тензиометра производится непосредственно по манометру прибора.

Обычно пористые элементы тензиометров проницаемы для солей, поэтому такие приборы могут измерять капиллярную составляющую потенциала влаги. В последние годы появились разработки аналогичных приборов, приспособленных для измерений полного потенциала влаги. В них пористый элемент заменен специальной пропускающей воду мембраной, непроницаемой для ионов соли. При использовании подобных мембран перенос воды происходит до момента компенсации действия потенциалов осмотического и капиллярного. Соответственно отсчет по манометру такого прибора будет эквивалентен полному потенциалу влаги.

Для измерений давления в тензиометрах ранее использовались преимущественно жидкостные манометры (водяные или ртутные).

Более современные приборы снабжены механическими манометрами со стрелочным указателем. Известны также варианты конструкций тензиометров, приспособленные для дистанционного отсчета давления. В подобных приборах применяются специальные манометры с преобразователями потенциометрического типа. Сигнал, пропорциональный измеряемому давлению, выдается в форме сопротивления или напряжения.

Практическое применение тензиометров в полевых условиях принципиально возможно, но ограничено необходимостью периодического долива воды в систему, а также засорением и необходимостью промывки пористых элементов при длительной работе в почве, особенно в условиях орошаемых полей. Несмотря на эти ограничения, приборы типа тензиометров используются для управления поливом.

Осмотическое давление, или осмотический потенциал почвенного раствора, определяется на почвенных вытяжках. Для получения вытяжки к почвенной пробе добавляют определенное количество воды. После тщательного перемешивания и выдержки смеси из нее вакуум-отсосом удаляют почвенную вытяжку, на которой и производят необходимые измерения.

Осмотическое давление может быть измерено любым из методов, используемых при определении концентрации клеточного сока, а также упоминавшимися выше методами определения потенциала влаги: по точке замерзания и по относительной влажности воздуха над раствором.

Каждый из упоминавшихся методов измерения потенциала влаги имеет ограниченный диапазон использования, в котором его точность и чувствительность максимальны. В табл. 10 приведены типичные диапазоны работы приборов.

Таблица 10

Диапазоны работы приборов для измерения потенциала влаги

Методы измерения	Давление, кг/см²	pF
Пресс-пластина	0— 1,0	0—3,0
Тензиометр	0— 1,0	0—3,0
Центрифуга	1—30,0	3—4,5
Мембранный пресс	0—10,0	0—4,0
Метод точки замерзания (для насыщенных глин)	0,2—10,0	2—4,0
Психрометр	1,0— 3,0	3—4,5

Кроме описанных методов определения потенциалов влаги в почве, для этой цели могут использоваться также влагопотенциометры на основе пористых блоков, рассмотренные в § 7 и 9. Наиболее распространены гипсовые блоки, для которых диапазон эквивалентных давлений 1—10 кг/см².

§ 4. Основы измерительных методов

В зависимости от методов измерений могут быть получены различные параметры влагосодержания почвы. В основном определяют весовую или объемную влажность.

Под весовой влажностью обычно понимают содержание влаги в граммах, приходящееся на единицу веса абсолютно сухой почвы,

$$W_в = \frac{F_в}{F_{сп}}. \qquad (II.11)$$

Объемная влажность определяется как вес воды, содержащейся в единице объема сухой почвы,

$$W_о = \frac{F_в}{V_{сп}}, \qquad (II.12)$$

здесь $F_в$ и $F_{сп}$ — вес влаги и сухой почвы в образце, $V_{сп}$ — объем образца сухой почвы. Соотношение между $W_в$ и $W_{сп}$ может быть получено с учетом плотности сухой почвы $\rho_{сп} = \frac{F_{сп}}{V_{сп}}$

$$W_в = \frac{W_о}{\rho_{сп}}. \qquad (II.13)$$

Если учесть, что для влажной почвы $\rho_{вп} = \rho_{сп} + W_о$, то

$$W_в = \frac{W_о}{\rho_{вп} - W_о}. \qquad (II.14)$$

Это соотношение используется в случае необходимости перехода от объемной влажности к весовой.

В последние годы появились работы, в которых влажность почвы связывается с потенциалом влаги. Подобные связи наиболее полно проявляются при использовании относительно более сложных комплексных параметров, в основу которых положена влажность почвы. Один из наиболее удачных вариантов предложен Б. Н. Мичуриным [15]. В качестве комплексного параметра используется отношение влажности почвы к ее удельной поверхности. При его использовании можно построить унифицированную зависимость между этим параметром и потенциалом влаги (сосущей силой почвы), единую для большой группы почв. Удельная поверхность, равная сумме площадей поверхности почвенных частиц, содержащихся в единице веса почвы, является относительно устойчивым параметром для почвы. Практически имеет место незначительная зависимость удельной поверхности от плотности при изменениях последней в пределах естественного уплотнения в течение вегетационного периода. Поэтому полученная зависимость комплексного параметра от сосущей силы почвы позволяет рассчитать

количество доступной растению влаги по данным о влажности почвы.

Измерение влагосодержания почвы производится двумя группами методов [4, 20, 23].

1. Методы, связанные с разделением влаги и твердых элементов. Они включают два типа методик. Экстракционные методики предусматривают извлечение влаги в промежуточный носитель с последующим определением характеристик этого носителя. Для почвы они практически не применяются. При методиках сушки, или, как их иногда называют, гравитационных, влага удаляется из почвенного образца, а затем регистрируется изменение веса или объема образца, связанное с удалением воды.

Измерения влажности реализуются на пробах и производятся в условиях лаборатории. Трудоемкость методик этой группы довольно высокая.

2. Методы, связанные с определением физических параметров почвы, зависящих от ее влагосодержания (по электрическим, тепловым параметрам почвы, по взаимодействию почвы с радиоактивными излучениями). При реализации этих методов используются особенности почвы как многофазной дисперсной системы, для которой физические характеристики могут определяться аддитивно по ее элементам. Реализация такого принципа возможна в тех случаях, когда имеют место большие различия в константах между элементами, составляющими систему.

Конкретно для почвы, состоящей из минерального каркаса, включений органических веществ, воды и воздуха, наибольшие различия в значениях физических констант наблюдаются при сравнении воды с другими элементами системы.

Для теоретических расчетов зависимостей физических констант почвы от влагосодержания используются разнообразные структурные модели многофазных систем. Одна из возможных расчетных схем предложена В. И. Оделевским [18]. Эта схема позволяет рассчитать, в частности, такие параметры, как электропроводность, диэлектрическую проницаемость, теплопроводность. Экспериментальная проверка этой расчетной схемы применительно к почве проводилась для коэффициента теплопроводности и дала удовлетворительные результаты.

Методика расчета Оделевского справедлива:

— для изотропной среды, составленной из частиц одного размера, причем элементы фаз системы также должны быть изотропными;

— для случая, когда можно пренебречь наличием поверхностных и контактных явлений.

Необходимо отметить, что в практически важных случаях для конкретных почв эти условия выполняются не всегда.

В соответствии с расчетной схемой рассматривается статистическая смесь, состоящая из k фаз. Для случая определения параметра $\varkappa$ системы, для которой даны $\varkappa_i$ и объемные концентрации

V_i, для всех фаз вводится вспомогательная система II, в которой $\varkappa_i^{\text{II}} = \frac{\varkappa_i}{\varkappa}$, и рассматривается поле в этой вспомогательной системе. В результате расчета получают уравнения вида

$$\sum_i^k \frac{\varkappa_i - \varkappa}{\varkappa_i + 2\varkappa} V_i = 0, \qquad \text{(II.15)}$$

решая которые можно определить искомые параметры системы.

В частном случае для двухфазной системы ($k=2$) получено следующее соотношение:

$$\varkappa = \sqrt{\frac{[(3V_1-1)\varkappa_1 + (3V_2-1)\varkappa_2]^2}{16} + \frac{\varkappa_1\varkappa_2}{2}} + \frac{(3V_1-1)\varkappa_1 + (3V_2-1)\varkappa_2}{4}. \qquad \text{(II.16)}$$

Именно эта зависимость экспериментально проверялась для коэффициента теплопроводности кварцевого песка λ. В настоящее время нет данных о постановке опытов для проверки формул типа (II.15) применительно к другим физическим параметрам или к более сложным системам ($k \geqslant 3$), хотя общие физические принципы (представления об обобщенной проводимости) позволяют предполагать правомерность такой экстраполяции. В частности, это относится к рассмотренным ниже параметрам, используемым при реализации разнообразных методов измерения влагосодержания почвы.

§ 5. Весовые методы оценки влагосодержания почвы

Несмотря на большую трудоемкость измерений, весовые методы определения влажности почвы до настоящего времени остаются наиболее распространенными, а во многих случаях они используются как контрольные и эталонные. Такое положение в большой мере обусловливается не только простотой самого процесса измерений на образце почвы, но и высокой надежностью этих измерений, обеспечивающей хорошую повторяемость результатов при выполнении элементарных требований, которые сводятся к соблюдению простейших правил взвешивания и контролю режима сушки.

Положительные качества метода сушки реализуются только при правильной системе отбора образцов с поля, но этот вопрос больше относится к проблеме репрезентативности оценок влажности почвы для массива по единичным измерениям и будет рассмотрен в главе IV.

Для взятия проб почвы применяются специальные буры, вырезающие почвенный керн. В основном приходится измерять влажность в верхней зоне почвы (до глубины 1 м), и поэтому большинство буров рассчитано на такую глубину. В случае необходимости возможно удлинение бура за счет дополнительных штанг, закре-

пляемых на «холостом» конце режущей секции. В этом случае, как и при любых других измерениях на поле, принимаются меры, предупреждающие повреждение растений на исследуемом участке.

Образцы почвы с верхних горизонтов (0—5 и 5—10 см) можно брать из вертикальной стенки небольшой ямки, не прибегая к помощи бура. Можно также использовать специальные трубки-пробники для взятия проб в этой зоне.

В случаях слоистой структуры поверхностной части почвенного профиля при условии, что слои существенно различаются по водным свойствам или механическому составу, образцы почвы лучше брать без помощи бура из вертикальных стенок неглубокого шурфа. При необходимости большой повторности для этих горизонтов допускается взятие двух повторностей образцов из противоположных стенок шурфа. При этом проба берется так, что образец захватывает весь слой, к которому он относится. Одновременно производится точная привязка образца к горизонту. После взятия образцов поверхностных горизонтов дальнейшие пробы берутся с помощью бура, внедряемого в дно шурфа.

При наличии в почвенном профиле слоев, различающихся по свойствам, уровни взятия образцов могут быть установлены таким образом, чтобы в одной пробе не смешивалась почва двух соседних слоев.

После завершения взятия образцов скважина и шурф засыпаются остатками почвы и уплотняются.

Проба почвы помещается в маркированный стандартный стакан с крышкой, предупреждающей иссушение образца в процессе транспортировки и хранения. В условиях правильной организации работы обработка проб осуществляется немедленно после отбора, но, как показали специальные эксперименты, хранение образцов в закрытых стаканчиках в течение трех суток не приводит к существенному изменению их влажности (ошибка в пределах 1% начального влагосодержания).

Определение влажности образцов почвы сводится к их высушиванию в открытых стаканчиках. Обычно сушка производится в воздушных термостатах при температуре 100—105° С. Перед началом сушки и далее образцы взвешивают. Взвешивание осуществляют в закрытых стаканчиках после охлаждения их до комнатной температуры. Первый цикл сушки включает время разогрева шкафа и выдержку до 5—7 часов. Затем образец взвешивают каждый час в процессе сушки и прекращают в случае, если разница в весе между двумя соседними измерениями не превышает 0,02 г (для обычно используемых образцов весом около 40 г). Практически бывает достаточно двух-трех взвешиваний.

При наличии в почве значительного количества органических веществ, которые могут окисляться при высоких температурах, сушка производится при комнатной температуре в вакууме в присутствии осушителей (хлористый кальций, пятиокись фосфора и т. п.).

По результатам взвешиваний рассчитывается влажность почвы в процентах к весу сухой почвы:

$$W = \frac{B_1 - B_2}{B_2 - B_0} 100\%,$$

где B_1 — вес стаканчика с почвенной пробой до сушки, B_2 — вес стаканчика с почвенной пробой после конца сушки, B_0 — вес алюминиевого стакана.

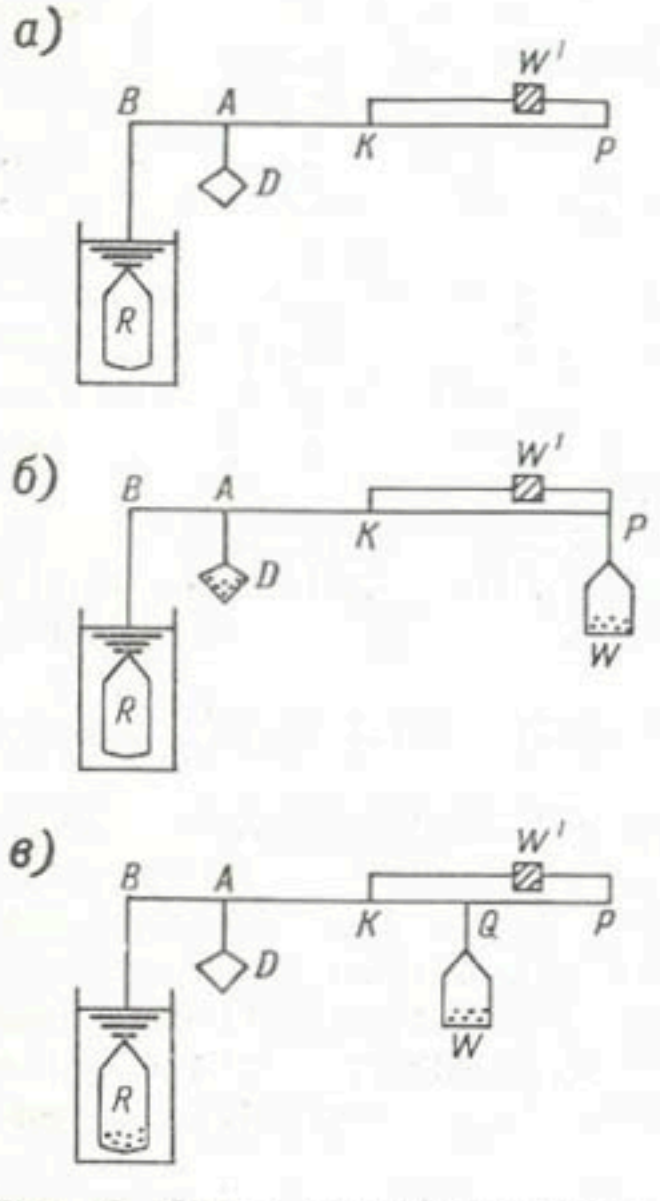


Рис. 18. Схема устройства весов влажности.

а — подготовка к измерению. *б* — взвешивание почвенного образца в воздухе. *в* — взвешивание почвенного образца в воде.

Принципиально возможно применение специальной весовой аппаратуры для непосредственного определения влажности почвы.

Отношение кажущейся массы образца при погружении в воду M_a, которую можно определить по закону Архимеда, к полной массе образца в воздухе M равно

$$\frac{M_a}{M} = \left(1 - \frac{\rho_w}{\rho}\right)\left(\frac{100 - W_в}{100}\right),$$

здесь $W_в$ — влажность почвы в процентах по отношению к влажному весу, ρ_w и ρ — плотность воды и почвенного каркаса. Это соотношение позволяет определить влажность почвы, проведя серию последовательных взвешиваний, без дополнительной обработки образца в термостате.

Разработан специальный прибор [4] — весы влажности для реализации метода последовательных взвешиваний. Шкала прибора градуирована в значениях влажности почвы. Этот прибор с использованием модифицированной методики измерений позволяет определять и плотность почвы.

Схема весов влажности приведена на рис. 18. Весы имеют две чашки для размещения образца почвы: сосуд D для взвешивания в воздухе и сосуд R для взвешивания в воде. Уравновешивание производится с помощью двух разновесов W' и W, которые могут передвигаться вдоль плеча уравновешивания. Плечо BK градуируется в единицах плотности почвы, а плечо KP —в единицах влажности.

Измерение влажности сводится к следующей процедуре.

1. Весы уравновешивают разновесом W' с сосудом R, погруженным в воду, и сосудом D, размещенным на рычаге в точке A, соот-

ветствующей по шкале фактической плотности образца почвы ρ. Если плотность безводной почвы не известна, она может быть определена с помощью тех же весов. При грубых измерениях допускается приблизительная установка плотности.

2. С помощью разновеса W, помещаемого в точку P, уравновешивают весы с образцом почвы произвольной массы M, помещенным в сосуд D. При этом $ML = WL_0$.

3. Образец почвы перемешивают с водой в сосуде R и далее, перемещая разновес W вдоль шкалы влажности, уравновешивают весы при погружении в воду сосуда R. При этом $M_a l_0 = Wl$. Отсчет влажности почвы производится непосредственно по положению разновеса W на рычаге весов.

Из условий уравновешивания в воздухе и воде следует: $\frac{M_a}{M} = \frac{Ll}{L_0 l_0}$. Отсюда

$$l = \frac{l_0 L_0}{L}\left(1 - \frac{\rho_w}{\rho}\right)\left(\frac{100 - W_в}{100}\right) = k_1 (100 - W_в),$$

где $k_1 = \frac{l_0 L_0}{100 k_2}$, а произвольный коэффициент k_2 определяют по соотношению $L = k_2\left(1 - \frac{\rho_w}{\rho}\right)$, обеспечивающему сохранение нормального масштаба шкалы влажности при изменении плотности нерастворимой части образца.

Так как весовые методы определения влажности почвы обычно используются как эталонные и контрольные, рассмотрим подробнее вопрос о возможной инструментальной погрешности этих методов.

Для метода сушки источником ошибок является неточность взвешивания. На основе положений теории погрешности для ошибки ΔW, связанной с определением влажности почвы, можно получить соотношение

$$\Delta W = 2\,\frac{1 + W}{B_2 - B_0}\,\Delta B,$$

где ΔB — абсолютная погрешность взвешивания (одинаковая для B_1, B_2, B_0). Относительная погрешность определения влажности равна

$$\frac{\Delta W}{W} = 2\Delta B\,\frac{B_1 - B_2}{(B_1 - B_0)(B_2 - B_0)} \cdot 100\%.$$

В условиях обычных измерений вес образца почвы $B_1 - B_0 = 20 \div 40$ г. Вес влаги, содержащейся в образце $(B_1 - B_2)$,

составляет 5—30% веса сухой почвы. При этом относительная погрешность измерений влажности

$$\frac{\Delta W}{W}\Big|_{W=0{,}05\div 0{,}3} \approx (2 \div 0{,}4)\,\Delta B \cdot 100\%.$$

При точности взвешивания 0,01 г $\frac{\Delta W}{W} \approx 2 \div 0{,}4\%$. Абсолютная инструментальная погрешность определения влажности почвы методом сушки составит $\Delta W = 0{,}1\%$ по отношению к весу сухой почвы.

При использовании аппаратуры типа весов влажности наибольшую трудность представляет определение плотности твердой составляющей почвы. Этот фактор является лимитирующим при оценке ошибок измерений, так как остальные источники погрешности могут дать относительно небольшие дополнительные ошибки.

В случае приблизительной оценки величины ρ_w возникает ошибка в определении влажности почвы на весах влажности $\Delta W_в$. Анализ показал, что эту абсолютную погрешность можно оценить по соотношению

$$\Delta W_в \approx \frac{100 - W_в}{1 - \alpha}\,\alpha^2 \Delta\left(\frac{1}{\alpha}\right),$$

$$\alpha = \frac{\rho}{\rho_w}.$$

Для компонент почвы соотношение $\alpha = 2{,}2 \div 2{,}8$. При среднем значении $\alpha \approx 2{,}5$ и пределах изменения $W_в = 5 \div 30\%$ ориентировочно $\Delta W_в \approx (20 \div 24)\,\Delta\left(\frac{1}{\alpha}\right)$. Для определения влажности с точностью 1% от веса влажной почвы необходимо, чтобы ошибка в определении плотности нерастворимой части почвы не превышала 0,05 г/см^3 (около 2%). Поскольку плотность минерального каркаса — относительно устойчивый параметр почвы для данного поля, то такие требования к точности его определения вполне выполнимы.

Оценка ошибок показывает, что использование метода сушки в качестве эталонного вполне обосновано, так как этот метод обладает чрезвычайно малой инструментальной погрешностью, вполне допустимой в условиях колебаний влажности почвы на одном поле в естественных условиях.

Метод весов влажности не может быть использован в качестве контрольного вследствие его недостаточной точности, однако в практических условиях он обладает неоспоримыми преимуществами перед методом сушки. Помимо быстроты и простоты измерений, имеет значение возможность автоматизации измерений при регистрации величины влажности. Известные удобства представляет также возможность использования образцов любой массы без дозировки и предварительного взвешивания.

Недостатки метода весов влажности связаны с необходимостью точных определений плотности.

§ 6. Связь электрических характеристик с влажностью почвы

Используя метод обобщенной проводимости, на основании формулы (II.15) получаем выражение, связывающее электропроводность с влажностью почвы:

$$V_1 \frac{\sigma_1 - \sigma}{\sigma_1 + 2\sigma} + P \frac{\sigma_2 - \sigma}{\sigma_2 + 2\sigma} + W_0 \frac{\sigma_3 - \sigma}{\sigma_3 + 2\sigma} = 0, \qquad \text{(II.17)}$$

здесь σ — электропроводность влажной почвы; σ_1, σ_2, σ_3 — соответственно электропроводность твердой фазы почвы, воздуха и влаги, V_1 — объемное содержание твердой фазы, P — пористость и W_0 — влажность почвы.

Ввиду сложности структуры почвы и ее химико-минералогического состава, не учитываемых в расчетных схемах метода Оделевского, расчетные формулы типа (II.17) позволяют дать только качественную оценку искомых зависимостей. Более детальный анализ возможен на основе экспериментальных данных, по которым строятся эмпирические формулы. Так, для электропроводности при постоянной температуре получены зависимости типа

$$W = \frac{q}{R^2} + b,$$

где R — сопротивление почвы, a и b — постоянные коэффициенты.

Одновременный учет влияния температуры и влажности приводит к более сложным формулам:

$$\sigma = W^a \exp(b + ct) \qquad \text{(II.18)}$$

или

$$\sigma = \sigma_0 [1 - \alpha (t - t_0)]; \qquad \text{(II.19)}$$

здесь $b = (-10{,}5) \div (-14{,}2)$, $c = 0{,}025 \div 0{,}031$, $a = 0{,}81 \div 1{,}41$ — эмпирические коэффициенты. В формуле (II.19) коэффициент α является функцией влажности почвы: $\alpha = m + \frac{n}{W} + \frac{q}{W^2}$, а значения коэффициентов m, n и q зависят от пористости.

Формулы (II.18) и (II.19) используются при измерениях влажности почвы по электропроводности. Для иллюстрации можно привести зависимость удельного сопротивления от влажности почвы $\rho = f(W)$ для ряда почв СССР и зависимость удельного сопротивления от температуры при разных влажностях (рис. 19).

При измерениях сопротивления почвы следует обоснованно выбирать систему электропитания приборов. При использовании электропитания постоянным током существенные погрешности вносятся за счет явления поляризации, приводящей к уменьшению тока через систему. Указанное уменьшение тока соответствует фиктивному росту сопротивления. Эффект поляризации зависит от величины напряжения, прикладываемого к образцу.

Для измерительных систем переменного тока необходимо учитывать частотные характеристики проводимости ионных проводников, к которым может быть отнесена и почва. В этом случае оказывается существенным токораспределение в почвенном образце, явление ориентации дипольных молекул в пограничных слоях гидратных комплексов и т. д. Частотная характеристика проводимости может быть представлена в форме соотношения

$$\sigma = \frac{k_0}{\sqrt{\nu}} + k_1\nu + k_2\nu^2; \qquad (II.20)$$

здесь k_0 — постоянная, характеризующая проводимость на постоянном токе, ν — частота, а k_1 и k_2 — коэффициенты, определяющие влияние процессов токораспределения и поляризации. На доста-

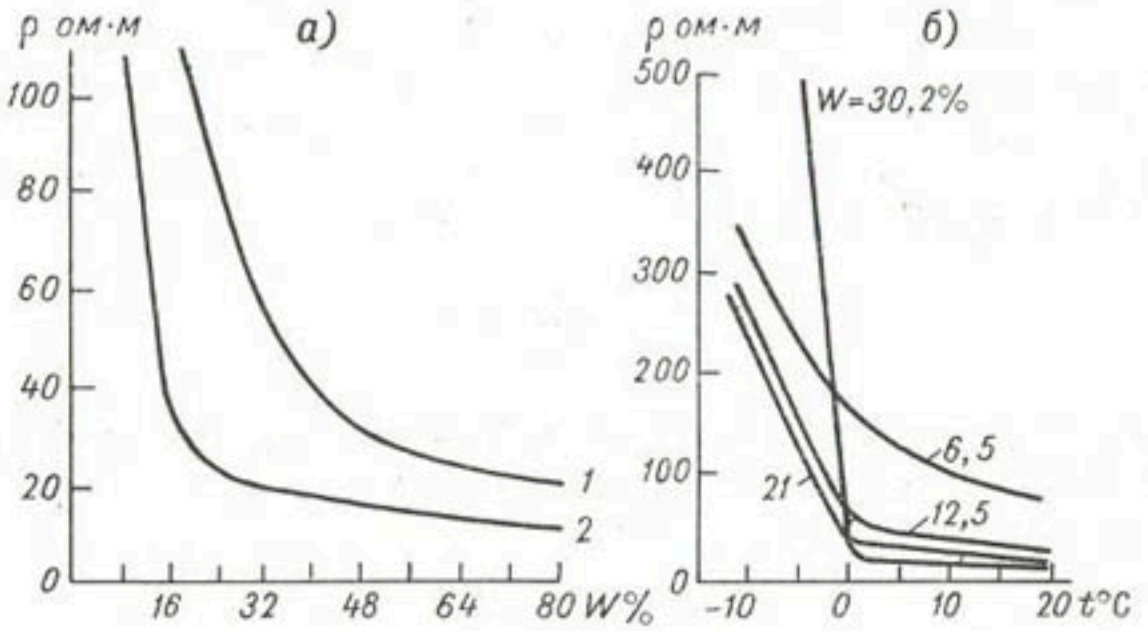


Рис. 19. Зависимость удельного сопротивления почвы ρ от влажности (*а*) и от температуры при разных влажностях почвы (*б*).

а) *1* — тонкодисперсная почва, *2* — грубодисперсная почва.

точно высоких частотах проводимость воды не зависит от концентрации солей. Изменение проводимости воды с частотой показано на рис. 20. Начиная с 10 000 Мгц солевой состав воды не влияет на ее удельное сопротивление.

Измерение влажности по удельному сопротивлению (проводимости) реализуется в основном при использовании равновесных методов с пористыми блоками. Непосредственно по сопротивлению почвы измерять ее влажность трудно, так как по существу сопротивление образца почвы значительно сильнее зависит от концентрации диссоциирующихся примесей, чем от содержания влаги. Этот же фактор ограничивает выбор материалов, применяемых для изготовления пористых блоков, так как в ряде материалов соли могут диффундировать в блоки и влиять на результат измерений.

Теоретические формулы, применяемые для расчета связи диэлектрической проницаемости с влажностью почвы, могут быть получены из (II.15) аналогично формуле (II.17) для электропровод-

ности. В данном случае также существенны и отмеченные выше источники погрешностей.

Есть сведения, указывающие на отличие диэлектрической проницаемости связанной воды от значения этого параметра свободной влаги, причем значение относительной диэлектрической проницаемости зависит от энергии связи влаги. Использование подобных зависимостей открывает возможности создания новых методов исследования влаги в дисперсных материалах, к которым отно-

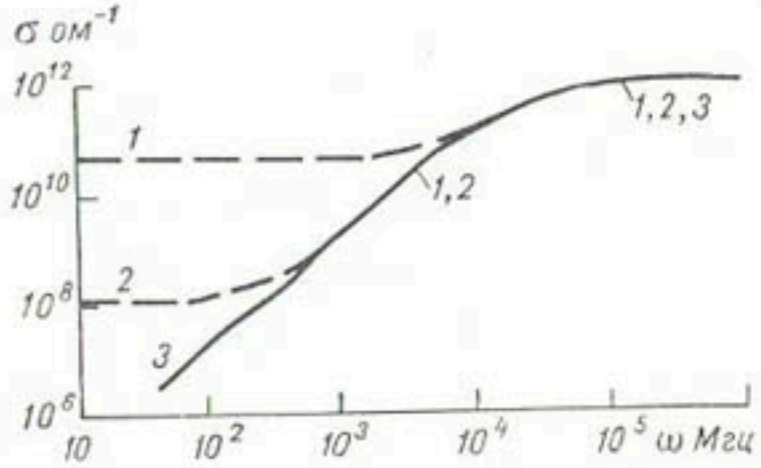


Рис. 20. Зависимость проводимости воды от частоты.

1 — морская вода, *2* — пресная вода, *3* — дистиллированная вода.

сится и почва. Значение диэлектрической проницаемости связано с поляризацией молекул и их относительными перемещениями при приложении электрического поля. Очевидно, что у молекул связанной влаги эти процессы протекают не совсем одинаково со свободно перемещающимися молекулами воды.

Абсолютные значения отклонений от теоретических формул для диэлектрической проницаемости ε будут меньше, чем для электропроводности, так как изменение количества влаги в почве зна-

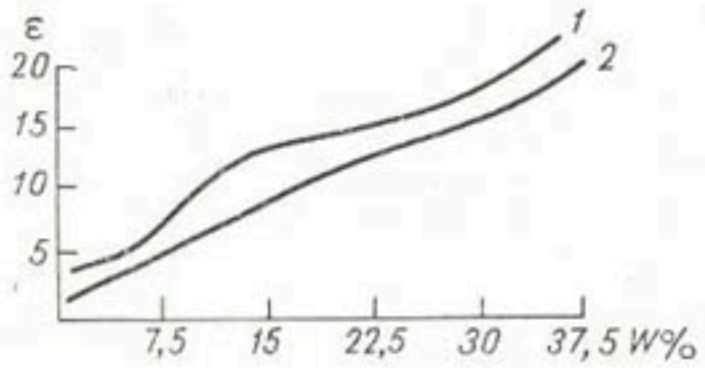


Рис. 21. Зависимость диэлектрической проницаемости ε от влажности почвы.

1 — почвенная фракция 0,5—1 мм, *2* — почвенная фракция 0,25—0,5 мм.

чительно сильнее меняет общее ε смеси, чем фактические значения большинства остальных физических параметров (рис. 21).

Значительно слабее выражена в этом случае зависимость от температуры, по крайней мере для средних и низких частот (рис. 22).

Очевидно, что диэлектрическая проницаемость является одним из наиболее удобных параметров для измерений влажности, тем более, что для воды $\varepsilon = 80$, а для материалов минерального каркаса почвы диэлектрическая проницаемость колеблется от 3 до 12. Благодаря такому соотношению возможно достаточно точное определение влагосодержания, которое может быть реализовано при

измерении емкости стандартного конденсатора, наполненного исследуемым материалом, либо при измерении поглощения электромагнитного излучения.

Принципиально возможна реализация измерений влажности по полному сопротивлению катушки индуктивности [4], в которой материал сердечника заменен исследуемым объектом, но для почвы подобные методы практически не использовались. Это относится также и к определению влагосодержания почвы по поглощению электромагнитной энергии на сверхвысоких частотах (порядка ты-

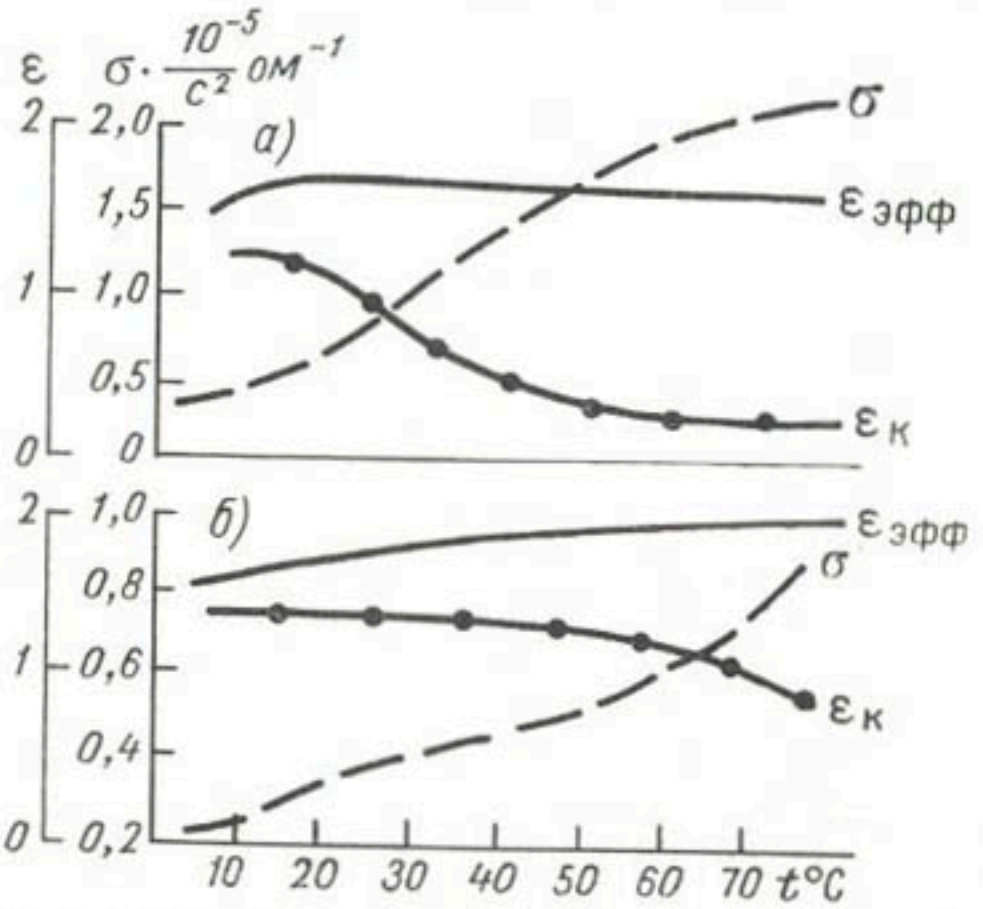


Рис. 22. Зависимость электрических характеристик почвы от температуры.

а — при измерениях на частоте 1,2 кгц, *б* — при измерениях на частоте 810 кгц. $\varepsilon_{эфф}$ — диэлектрическая проницаемость влажной почвы, $\varepsilon_к$ — диэлектрическая проницаемость почвенного каркаса, σ — электропроводность почвы.

сяч мегагерц). Подобные методы использовались для определения влажности строительных материалов и конструкций, по составу весьма близких к почвенным системам.

При реализации метода поглощения электромагнитной энергии [4] исследуемый образец устанавливается между антеннами радиопередатчика и приемника, причем о влажности образца судят по ослаблению излучения. В этом случае также необходима калибровка аппаратуры для данного типа почвы. Кроме того, возможности измерительной методики такого типа ограничены необходимостью использования образца достаточно большой площади, что обусловлено размерами антенн.

Как в емкостном, так и в индуктивном методах, а также и в методе поглощения высокочастотной электромагнитной энергии

содержание влаги по существу определяется по значению диэлектрической проницаемости ε или по соотношению между ε и проводимостью исследуемой среды.

§ 7. Электрические методы оценки влагосодержания почвы

В последнее время большое распространение получили различные электрические методы измерения влагосодержания почвы.

Дистанционные измерения динамики влагосодержания почвы в одной точке поля, как уже отмечалось, являются весьма важным достоинством всех электрических методов определения влажности почвы. Вопросы размещения датчиков на поле решаются так же, как и при взятии образцов почвы в случае применения весовых методов измерения влажности. Экспериментальная проверка показала, что при установке до трех датчиков последовательно в одной скважине не наблюдалось просачивания влаги вдоль проводов и заметного роста погрешностей измерения.

Засыпка скважины вынутой землей осуществляется таким образом, чтобы по характеристикам насыпанная почва максимально приближалась к естественному массиву по всей глубине, а особенно в зонах установки датчиков. Кабели от датчиков к измерителю закапываются ниже уровня пахотного слоя, что исключает их повреждение при обработке почвы и позволяет использовать кабельные линии несколько сезонов без замены.

При установке датчиков необходимо иметь в виду все отмеченное выше о размещении точек измерения (почвенных образцов) в условиях слоистых грунтов.

В данном разделе будут рассмотрены принципы конструирования и основные характеристики аппаратуры для прямых измерений влагосодержания, а также измерители потенциала почвенной влаги с применением электрических методов индикации.

Наиболее сложно создание аппаратуры для определения влажности непосредственно по характеристикам влажной почвы, поэтому метод электропроводности почвы практически почти не используется. Связь электропроводности с концентрацией соли и пористостью почвы делает измерения влажности мало достоверными. Правда, до последнего времени появляются публикации с описаниями новых модификаций комбинированных методов измерения влажности и плотности почвы по ее электропроводности. Усовершенствования сводятся в основном к ограничению токового канала и применению сложных систем экранирования измерительных электродов. Схема для типичного современного варианта [4] метода измерений электропроводности почвы приведена на рис. 23. Два измерительных зонда помещены внутри перфорированных изоляционных трубок в специальные скважины, заполненные водой. Каждый зонд состоит из одного измерительного и двух защитных трубчатых электродов. Такая конструкция обеспечивает достаточно

надежный электрический контакт между зондом и почвой. Перемещая зонд вдоль скважины, можно снять профиль сопротивления почвы между скважинами и при последующей обработке данных определить влажность почвы. Величины пористости и концентрации солей определяются в условиях искусственного увлажнения почвы между зондами до полевой влагоемкости. Поскольку электропроводность почвы сильно зависит от температуры, в зонде устанавливается термометр, регистрирующий изменение температуры почвы для последующей коррекции температурной ошибки.

В последние годы появились также и пневматические зонды, в которых контакт с почвой достигается за счет механического прижима токосъемника к почве при подаче газа внутрь эластичного зонда.

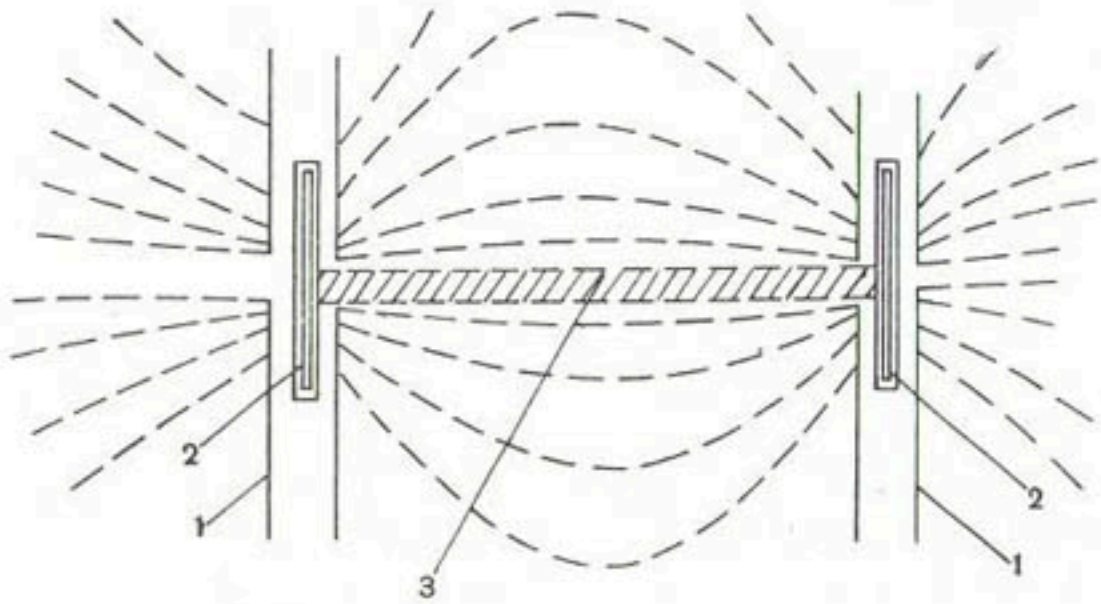


Рис. 23. Схема измерений электропроводности почвы.

1 — защитные электроды, *2* — измерительные зонды, *3* — зона, для которой осуществляются измерения проводимости.

Методика измерений электропроводности такого типа весьма сложна как с точки зрения процедуры измерений, так и по системе обработки исходных данных. Она непригодна для широкого распространения в агрометеорологической практике, а может быть применена только в специальных исследованиях.

Значительно более перспективными представляются емкостные методы определения влагосодержания почвы, основанные на зависимости диэлектрической проницаемости дисперсного материала от количества воды в нем.

Типовые конденсаторы, используемые для измерений, приведены на рис. 24. Емкости рассчитываются по известным формулам:

а) емкость плоского конденсатора

$$C = a\frac{\varepsilon S}{h}(n-1), \qquad \text{(II.21а)}$$

где ε — диэлектрическая проницаемость, S — площадь пластины, h — расстояние между пластинами, n — число параллельных плас-

тин, a — коэффициент, зависящий от размерности величин, входящих в формулу;

б) емкость конденсатора, образованного цилиндром и плоскостью, при условии, что расстояние между электродами h значительно больше радиуса цилиндра r:

$$C = a \frac{\varepsilon}{\lg 2h/r}; \qquad \text{(II.21б)}$$

в) емкость между двумя параллельными цилиндрами с радиусами r_1 и r_2:

$$C = a \frac{\varepsilon}{\lg h^2 r_1/r_2}; \qquad \text{(II.21в)}$$

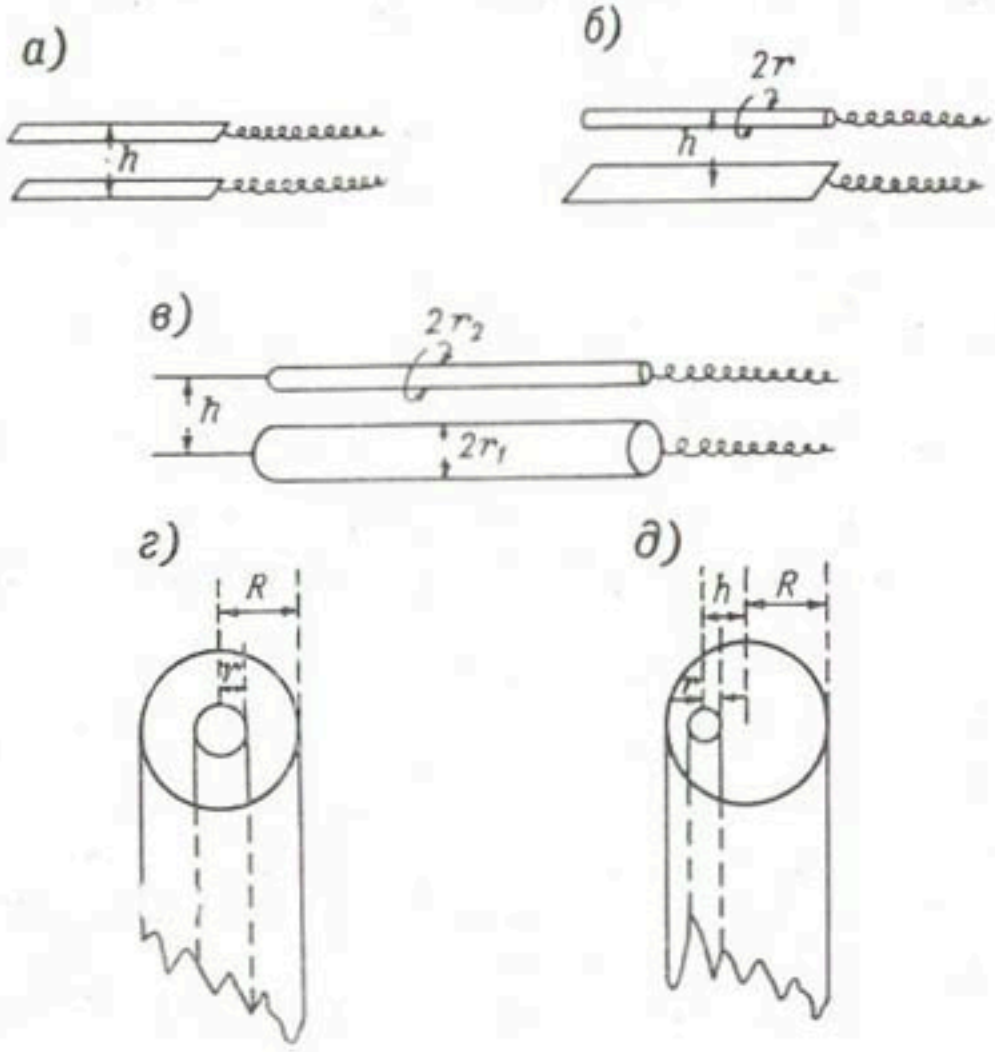


Рис. 24. Основные типы измерительных конденсаторов.

г) емкость коаксиального конденсатора при радиусе наружного электрода, равном R:

$$C = a \frac{\varepsilon}{\lg R/r}; \qquad \text{(II.21г)}$$

д) емкость эксцентричного цилиндрического конденсатора при расстоянии между центрами цилиндров b:

$$C = a \frac{\varepsilon}{\lg \frac{R^2 - b^2}{Rr}}. \qquad \text{(II.21д)}$$

Прямые измерения на почве реализуются на плоском, цилиндрическом и коаксиальном конденсаторах. Эквивалентная схема почвенного образца, помимо емкости, включает и шунтирующее сопротивление проводящего канала, обусловленное собственной проводимостью почвенного ионизированного раствора. Для уменьшения влияния проводимости почвы применяют бесконтактный метод измерений емкости, покрывая электроды конденсатора слоем изоляции.

Влияние проводимости почвы меняется при изменении частоты питания прибора. Для низких частот активная и емкостная составляющие тока хорошо разделяются, хотя само измерение емкости на низкой частоте производить неудобно. При высоких частотах поля в конденсаторе наличие межэлектродного активного сопротивления приводит к разогреву почвы, нежелательному с точки зрения точности измерений. Распределение тока в этом случае зависит от вида и размеров изоляции электродов. Помимо соображений, связанных с проводимостью почвы, выбор частоты определяется принятым методом индикации изменений емкости и требованиями конструктивного оформления.

При измерениях проводимости применяются низкие частоты (до 2 кгц), обеспечивающие исключение эффекта поляризации ионного раствора при малом воздействии на работу схемы емкостных элементов датчика и соединительной линии. В этом случае возможно применение относительно длинных линий связи, а монтажные паразитные емкости могут быть корректированы в измерительном блоке.

При реализации емкостных методов оценки влагосодержания желательно применение высоких частот, на которых легче осуществляется измерение емкости и ослабляется влияние активного сопротивления. С этой точки зрения для измерений емкости неудобно применять частоты ниже 1 Мгц. Верхний предел рабочих частот при измерениях емкости связан с увеличением коэффициента преломления вещества и обычно лежит в пределах 100 Мгц. При этом наблюдаются изменения диэлектрической проницаемости материала (почвы).

Применение высоких частот требует соблюдения известных правил при конструировании аппаратуры. В этом случае нежелательно использование длинных линий связи между датчиком и измерителем, паразитные емкости монтажа должны быть минимальны, предпочтительно производить измерения на больших массах вещества при малом расстоянии между электродами. Этим требованиям удовлетворяет аппаратура с плоским конденсатором, расположенным непосредственно у измерительного блока, что относительно легко реализуется для лабораторной аппаратуры и вызывает затруднения при создании полевых приборов.

Для относительно низких частот возможно создание дистанционной аппаратуры с размещением датчиков на поле, а измерительного блока — в пункте сбора информации.

Типовые измерительные схемы, используемые при определении влажности электрическими методами, приведены на рис. 25. При измерениях проводимости используются схемы омметров (на рис. 25 не приведены) и мостовые схемы.

Мостовые схемы при измерениях электропроводности и емкости работают на звуковых частотах (до 25 кгц). Плечо R_xC_x представляет эквивалент датчика. Конденсатор C_m используется для баланса моста по реактивной составляющей. Измерения обычно осуществляют в режиме равновесного моста. Неравновесные мосты с отсчетом параметра по сигналу разбаланса применяются редко.

Остальные схемы, приведенные на рис. 25, используются с емкостными датчиками на частотах от 1 кгц до 100 Мгц. Индикация настройки измерительной схемы осуществляется по стрелочным

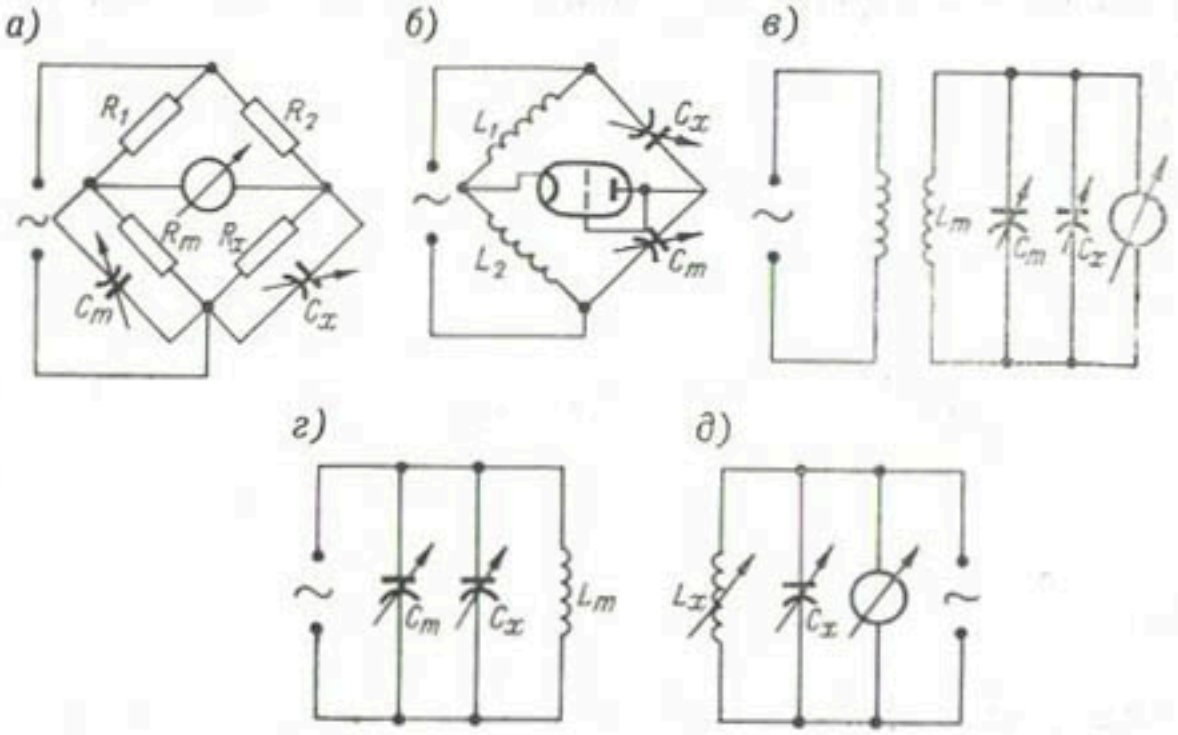


Рис. 25. Типовые схемы измерения емкости.

приборам. При питании схем звуковой частотой иногда используется акустическая индикация настройки (по минимуму интенсивности сигнала). Высокочастотные приборы с применением звуковой индикации баланса выполняются по схеме вычитания частоты. Разность частот измерительного и эталонного генераторов подается на индикатор.

Схемы *г* и *д* на рис. 25 (LC — генераторные контуры) могут быть использованы в системах с частотной модуляцией для телеизмерений влажности почвы. В этом случае индикация влажности почвы (емкости измерительного конденсатора) осуществляется по изменению частоты генератора. Схемы такого рода представляются перспективными с точки зрения выдачи информации в цифровой форме, а также с точки зрения возможности создания высокочастотной аппаратуры с емкостными датчиками, в которой генератор устанавливается в поле вместе с датчиком.

Схемы типа генераторного контура или резонансного индикаторного контура (рис. 25 *в*, *г*) принципиально могут

использоваться также и в случаях измерения влажности по изменению индуктивности контура: практически этот метод для почвы до сих пор не применялся.

Приведенные на рис. 25 простейшие схемы не исчерпывают всех возможных вариантов, хотя и отражают наиболее распространенные решения.

Выше отмечалось, что, помимо прямых измерений влажности с приложением электрического поля непосредственно к почве, возможны и косвенные измерения, при которых осуществляется электрическое определение влажности пористого блока по электропроводности или емкости. Потенциал влаги в пористом блоке равен потенциалу влаги в окружающей среде и однозначно связан с влажностью самого блока вследствие стабильности его капиллярной структуры. Таким образом, применение электрических методов в со-

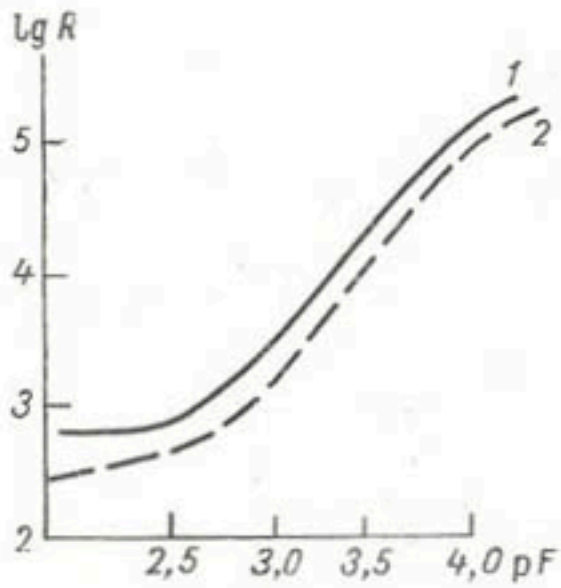


Рис. 26. Изменение характеристик гипсовых блоков после четырехлетнего использования в полевых условиях.

1 — начальная градуировка, *2* — конечная градуировка.

четании с пористыми блоками позволяет разработать простые полевые приборы для определения сосущей силы почвы.

Для изготовления пористых блоков использовались многие материалы: пористая керамика на различной основе, стекловолокно или нейлоновая ткань в сочетании с полимерными клеями, гипс, различные комбинации указанных компонент и т. д. Опыт показал, что почти все испытанные материалы могут применяться в виде пористых блоков, но большинство из них поглощает из почвы не только влагу, но и солевые составляющие почвенного раствора. Поэтому блоки из таких материалов имеют преимущества перед прямыми измерениями на почве только потому, что влияние естественной пористости почвы исключается, что во многих случаях также бывает важным. Для учета влияния солевого состава почвы необходима специальная тарировка датчиков в лаборатории, или подстройка чувствительности измерителя для данной почвы, включающая специфическую процедуру корректировки отсчета прибора в условиях максимального увлажнения непосредственно на поле (метод Л. Н. Степанова) [27].

Как известно, с точки зрения проницаемости для солей исключение составляют блоки из гипса, проводимость которых не зависит

от солевого состава среды в достаточно широких пределах концентрации солей. У гипса весьма высокий показатель собственной растворимости, поэтому ионы солей из среды практически не проходят внутрь гипсового блока. Это качество одновременно приводит к ограничению срока службы блока из чистого гипса [30], так как при длительном пребывании его во влажной среде из-за растворения гипса нарушается геометрия пор и датчик требует повторной градуировки. Пропитывая блоки из гипса полимерными смолами, увеличивают срок их службы и стабилизируют характеристики. Изменения характеристик блока из гипса в результате его четырехлетнего использования представлены на рис. 26.

Гипсовые блоки часто называют датчиками Бойукоса — по имени одного из первых разработчиков конструкции и технологии подобных датчиков. В настоящее время модернизированные гипсовые

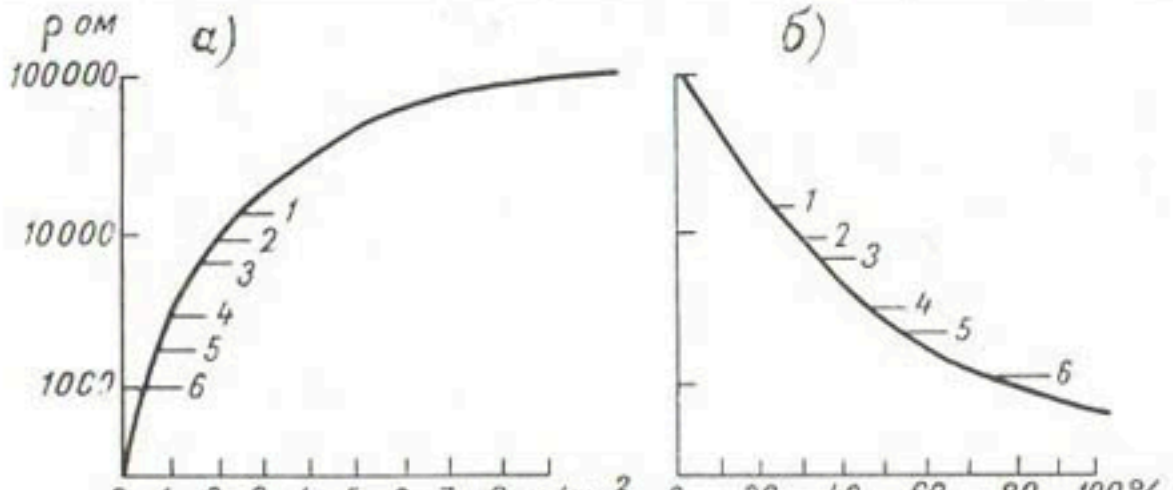


Рис. 27. Градуировочные характеристики гипсовых блоков по натяжению почвенной влаги (*а*) и доступной растению влаге (*б*).

Отмеченные на графиках точки соответствуют полевой влагоемкости различных почв: *1* — глина, *2* — наносный суглинок, *3* — суглинок, *4* — супесь, *5* — суглинистый песок, *6* — песок.

блоки изготавливаются из смеси 32 см³ воды и 40 г чистого гипса с последующей пропиткой блока раствором нейлона. Такой блок, по данным Бойукоса [4], может работать в сухой почве до 10 лет. По его же оценкам, точность измерений влажности почвы порядка 1% влагосодержания. При проверке точности и тарировке в качестве контрольного использован метод сушки.

Индикация влагосодержания пористых блоков обычно осуществляется по электропроводности. Промышленный образец прибора с питанием от батареи содержит генератор переменного тока 2 кгц и схему моста (иногда омметр) с диапазоном измеряемых сопротивлений 0—5 Мом.

В зависимости от назначения аппаратуры применяют различные системы тарировки датчиков. Два типа градуировочных характеристик представлены на рис. 27. Основной тип характеристики (рис. 27 *а*) связывает сопротивление блока с натяжением почвенной влаги (капиллярным потенциалом) и может применяться при

измерениях на любой почве. Используя данные о пределах доступной растению влаги, этот график можно трансформировать в зависимость (рис. 27 *б*) сопротивления блока от наличия доступной влаги (в процентах от разности между значениями полевой влагоемкости и влажности завядания). Отметки на графиках соответствуют значениям полевой влагоемкости для различных почвогрунтов.

Характеристики типа показанных на рис. 27 *б* менее универсальны, так как для их построения необходимо знать гидрофизические характеристики имеющегося типа почвы. Тем не менее они репрезентативны для больших массивов и наиболее удобны при использовании пористых блоков для управления поливом и оценки влагообеспеченности растений. Градуировку по этим показателям проводят в лаборатории с помощью прессов Ричардса или других приборов, измеряющих сосущую силу при увлажнении пористого блока.

На практике наиболее часта, хотя и не очень удобна, тарировка прибора, при которой электрическое сопротивление блока сопоставляется с весовой влажностью почвы. В этом случае градуировка пористого блока должна производиться непосредственно для той почвы, в которой будут установлены датчики аппаратуры (на почвенной модели).

Сопротивление пористых блоков заметно меняется с ходом температуры. Поэтому при необходимости точных измерений влагосодержания желательно включение элементов автоматической температурной компенсации в схему прибора. Возможно введение коррекции за счет дополнительной обработки полученных данных. Результаты измерений можно приводить к стандартным условиям по номограмме типа рис. 28.

В заключение остановимся на некоторых основных характеристиках рассмотренных электрических методов и перспективах их использования.

Электрические методы оценки влагосодержания могут найти применение и в лабораторных, и в полевых условиях. Наиболее важные преимущества всей группы электрических методов, как уже отмечалось, связаны с возможностью многократного измерения параметров в одной и той же точке поля, а также с возможностью организации дистанционных измерений и быстрого получения оперативной информации об изменениях влагосодержания почвы.

Наиболее существенным источником погрешности при прямых измерениях являются вариации плотности и концентрации солей в почве. В связи с этим для прямых измерений влагосодержания необходима тарировка датчиков по влажности в условиях естественного сложения и засоления почвы. Использование емкостных датчиков позволяет существенно ослабить влияние концентрации солей и плотности, хотя полностью исключить его не удается. Так как указанные параметры могут заметно изменяться даже в пределах одного поля, прямые электрические методы измерения влаж-

ности применяются редко. Дополнительная погрешность при измерении сопротивления может возникнуть из-за нестабильности контакта зонда с почвой.

В перспективе представляется целесообразным использование подобных методов в почвенных моделях (испарителях и лизиметрах), для которых необходима стационарная установка датчиков в почвенном монолите. Комбинированные измерения, при которых одна и та же пара электродов используется для определения па-

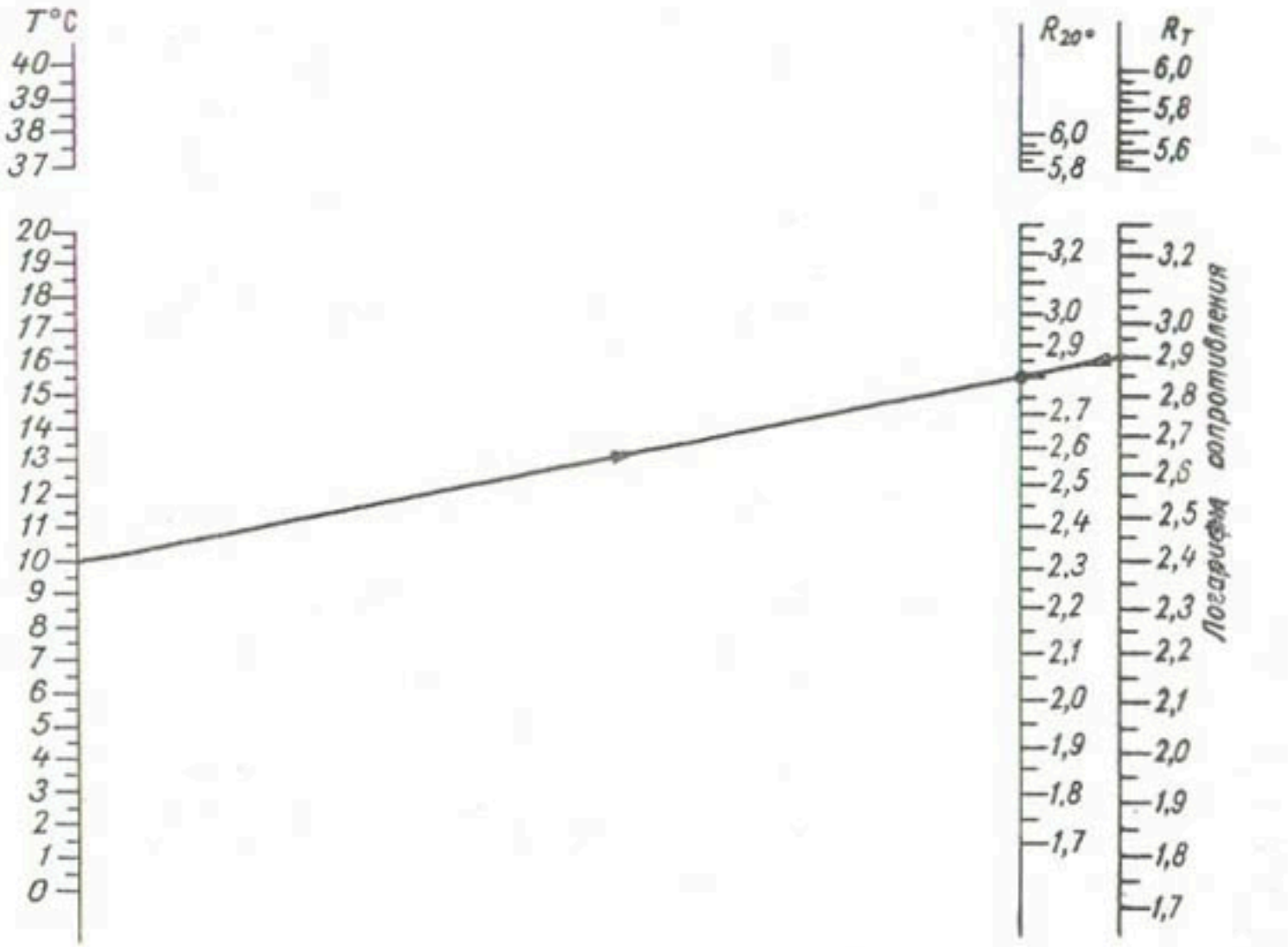


Рис. 28. Номограмма для коррекции температурной погрешности измерений влажности почвы с помощью гипсовых блоков.

раллельного или последовательного сопротивления и емкости, позволяют одновременно оценивать и влажность и концентрацию солей.

Результаты косвенных измерений с помощью пористых блоков не зависят от структуры почвы и ее пористости. В сочетании с пористыми блоками электрические методы измерений весьма удобны и могут обеспечить получение всего комплекса необходимых характеристик для создания датчика влаги, доступной растению. Наилучшими качествами с этой точки зрения обладает гипсовый блок.

Помимо упоминавшихся выше недостатков, связанных с ограниченным сроком службы пористых гипсовых блоков и ограниченным диапазоном измерений, необходимо указать еще на один дефект, свойственный всем типам пористых блоков. Для разных

материалов и пор любых размеров имеет место (в разной степени) гистерезис, приводящий к разному влагосодержанию блока при одной и той же влажности почвы, полученной при увлажнении или высыхании почвы. Не вдаваясь в сложные механизмы процессов обмена, отметим, что для практического использования данных наибольший интерес представляет ветвь сушки. Это необходимо учитывать и тарировать блоки в высыхающем массиве.

До последнего времени для измерений влагосодержания пористых блоков применялись в основном методы электропроводности, что обусловливалось простотой схемных решений аппаратуры по сравнению с измерениями емкости. В то же время емкостные методы начинают все шире применяться, хотя в наиболее эффективных высокочастотных приборах необходимо преодолевать некоторые технические трудности при значительном удалении датчика. В сочетании с пористыми блоками емкостные методы обеспечивают ослабление зависимости от концентрации соли, открывают возможности телеизмерений и т. п. Возможно применение комбинированных измерений проводимости и емкости для одного блока, лишенного буферных свойств.

§ 8. Связь теплофизических характеристик с влажностью почвы

Анализ показывает, что из множества факторов, воздействующих на теплофизические характеристики почвы (минеральный состав, структура, дисперсность, температура и т. п.), наиболее сильное влияние оказывает влагосодержание. Это объясняется тем, что при росте влажности почвенный воздух, обладающий низкой теплопроводностью и теплоемкостью, заменяется влагой, у которой и теплопроводность, и теплоемкость значительно выше. Другим параметром, существенно влияющим на теплофизические характеристики, является плотность почвы. Однако для интересующего нас случая использования теплофизических характеристик эта зависимость является паразитной и обусловливает появление дополнительной погрешности.

Расчеты почвенных моделей и экспериментальные данные говорят о том, что при изменении влажности почвы от абсолютно сухого состояния до полевой влагоемкости эквивалентные значения теплопроводности и температуропроводности могут увеличиться в 10 раз.

Среди теплофизических характеристик рассматриваются основные: теплопроводность λ и теплоемкость c, а также производные параметры: температуропроводность $k=\lambda/c$ и теплоусвояемость $b=\sqrt{\lambda c}$. При росте влажности теплоусвояемость изменяется монотонно с относительно большой крутизной зависимости, а соответствующая зависимость для температуропроводности имеет максимум.

Теоретические соотношения для связи основных теплофизических параметров с влажностью почвы так же, как и соответствую-

щие электрические параметры, могут быть получены на основе формулы (II.15). При этом погрешности теоретических зависимостей несколько выше, чем в рассмотренных ранее случаях электрических параметров, так как передача тепла связана с несколькими физическими механизмами (теплопроводность минерального каркаса, пленок воды и воздуха в порах почвы, конвективный перенос в воде и воздухе, термодиффузия паров воды и т. д.), а теория рассматривает только один из них — теплопроводность. Перенос тепла, связанный с перемещением массы вещества в пределах системы (конвекция, термодиффузия), не рассматривается расчетной схемой В. И. Оделевского. Недостаточная полнота модели значительно сильнее сказывается при анализе теплофизических параметров, чем электрических, для которых побочные механизмы проводимости, связанные с перемещением вещества, практически не вносят погрешностей. В связи с такими недостатками расчетной схемы целесообразно рассмотреть эквивалентные значения теплофизических параметров, складывающиеся при взаимодействии всех возможных механизмов переноса и непосредственно измеряемых в процессе экспериментов. По известным зависимостям основных теплофизических характеристик от влажности несложно воспроизвести соответствующие зависимости и для производных параметров.

На основании экспериментальных данных построены эмпирические зависимости, связывающие теплофизические параметры с влажностью W (в %) и другими характеристиками почвы [17, 32]. Для теплоемкости типична линейная зависимость

$$c_э = \left(c_c + \frac{W}{100}\right)\rho. \qquad \text{(II.22)}$$

Соотношение для коэффициента теплопроводности имеет характер кривой с насыщением при больших влажностях:

$$\lambda_э = a \exp(mW) + d, \qquad \text{(II.23)}$$

здесь $c_э$ и $\lambda_э$ — эквивалентные значения параметров; a, m и d — эмпирические коэффициенты, зависящие от типа почвы; c_c — теплоемкость почвенного каркаса; ρ — плотность почвенного образца. Типичные зависимости теплофизических параметров от влажности почвы приведены на рис. 29.

Работы по исследованию теплофизических характеристик почвы и связи их с влажностью почвы длительное время проводились в СССР под руководством А. Ф. Чудновского. Полученные материалы позволили построить серию номограмм для определения $\lambda_э$, $c_э$, $k_э$ по влажности и плотности для основных типов почв СССР. Ставилась и обратная задача: определение влагосодержания по теплофизическим характеристикам.

Достоинство теплофизического метода — относительно слабая зависимость измерений от содержания солей. Наиболее существенные недостатки — сильная зависимость результатов измерений от

термического контакта датчиков с почвой и необходимость градуировки датчиков для образцов почвы. Менее серьезны ошибки, связанные с влиянием температуры среды и нагревом датчика по отношению к среде. В последнем случае может появиться дополнительный перенос тепла, связанный с термическим переносом пленочной влаги и пара.

Измерения влажности почвы по теплофизическим характеристикам практически могут быть реализованы в двух типах методов.

Первый тип методов предусматривает использование термических зондов в нестационарном режиме, второй тип — расчетный, значения влажности получают по скорости распространения естественной температурной волны в почве в полевых условиях.

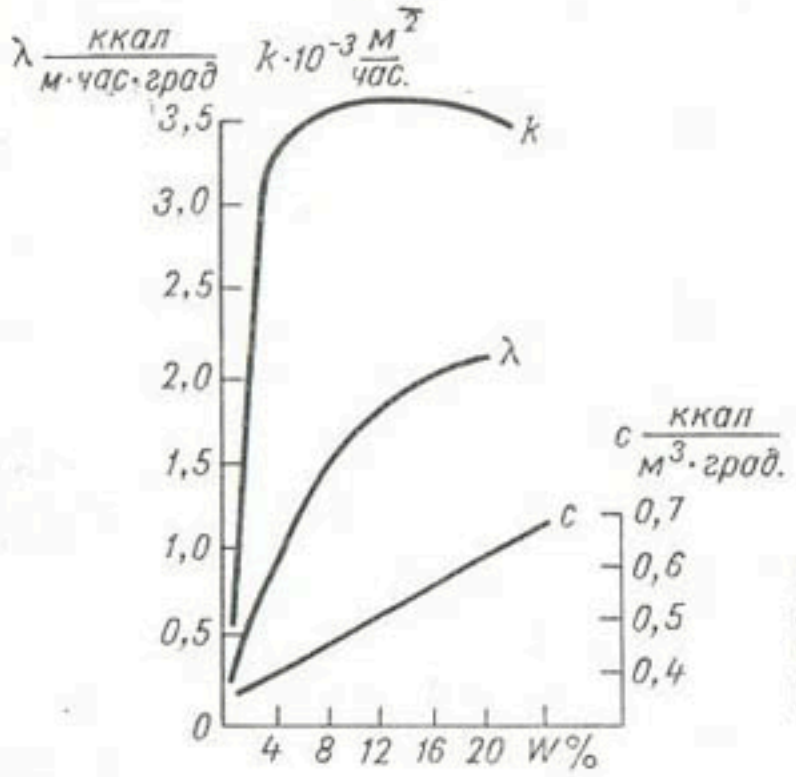


Рис. 29. Зависимость теплопроводности λ, теплоемкости c и температуропроводности k от влажности почвы.

Принципиально возможно и применение третьего метода измерения влажности: по данным лабораторных измерений теплофизических характеристик на пробах почвы. В последнее время появились полуавтоматические модификации этого метода [14].

Лабораторные теплофизические измерения заметно сложнее весовых измерений влажности и требуют тщательной подготовки проб с ненарушенной структурой и более трудоемкой обработки данных.

Расчетный метод определения теплофизических характеристик по естественному ходу температуры основывается на том, что за счет притока энергии от солнца на поверхности почвы наблюдается суточный ход температуры, близкий к синусоидальному (достаточно точно может быть представлен суммой двух гармоник). Параметры волны температуры в почве (амплитуда и фазовый сдвиг относительно хода температуры на поверхности) зависят от теплофизических характеристик почвы. Можно рассчитать зависимости параметров температурной волны непосредственно от влажности почвы. Для расчета теплофизических характеристик почвы по естественному ходу температуры измеряют температуру

почвы на двух уровнях четыре раза в течение суток, а затем по формулам обрабатывают данные.

Достоинства рассматриваемого метода сводятся к простоте реализации измерений и значительному объемному и временно́му осреднению вычисленных значений теплофизических параметров, а следовательно, и влажности почвы, определяемой таким образом. Во многих практически важных случаях осреднение по времени и объему весьма важно.

Недостатком метода является его невысокая точность. Наиболее просто определяемый параметр — температуропроводность — не оптимален с точки зрения чувствительности к изменению влажности почвы. Относительно малая точность метода связана, в частности, с недостаточно обоснованными расчетными моделями почвы с постоянными значениями теплофизических характеристик во всем слое, плохо отражающими реальные условия в поле.

Решение задачи теплопроводности для усложненных моделей почвы, в которых задается функциональная зависимость теплофизических параметров от глубины, приводит к еще более сложным рабочим формулам, применение которых для практических расчетов вызывает серьезные затруднения.

§ 9. Определение влажности почвы по теплофизическим характеристикам

Остановимся несколько подробнее на полевых методах определения влажности почвы по ее теплофизическим характеристикам. При несколько меньшей точности измерений тепловые методы оценки влажности практически не зависят от концентрации солей и в этом смысле имеют некоторые преимущества перед электрическими методами, рассмотренными выше. Общее достоинство обеих групп методов — возможность наблюдения динамики влаги с помощью постоянно установленных датчиков.

В полевых условиях теплофизические характеристики определяются с помощью термозондов, устанавливаемых в почве [4, 8]. Зонд имеет внутренний источник тепла. В процессе измерений регистрируется температура почвы или поверхности зонда. Измерение теплофизических характеристик основывается на закономерностях нестационарного теплообмена в дисперсных средах.

В случае мгновенного источника тепла измерения осуществляются по параметрам температурной волны в слое почвы, примыкающем к зонду. Амплитуда температуры в точке, удаленной от зонда, а также время распространения волны тепла дают возможность определять теплопроводность и теплоемкость, а по ним и влагосодержание почвы. Практически в качестве мгновенного используется импульсный источник тепла.

В зонде постоянной мощности измеряется температура самого зонда. В регулярном режиме температура зонда растет

пропорционально логарифму времени, причем темп нагрева зависит от теплофизических характеристик почвы.

Зонд постоянной мощности нашел практическое применение. На его принципе создано несколько вариантов приборов для измерения влажности почвы. В этих приборах нагреватель и термометр размещены в одном зонде, что облегчает практические измерения по сравнению с приборами, в которых используется мгновенный источник тепла.

Схема конструкции зонда приведена на рис. 30. Нагреватель изготавливается из термостабильного сплава. В качестве термо-

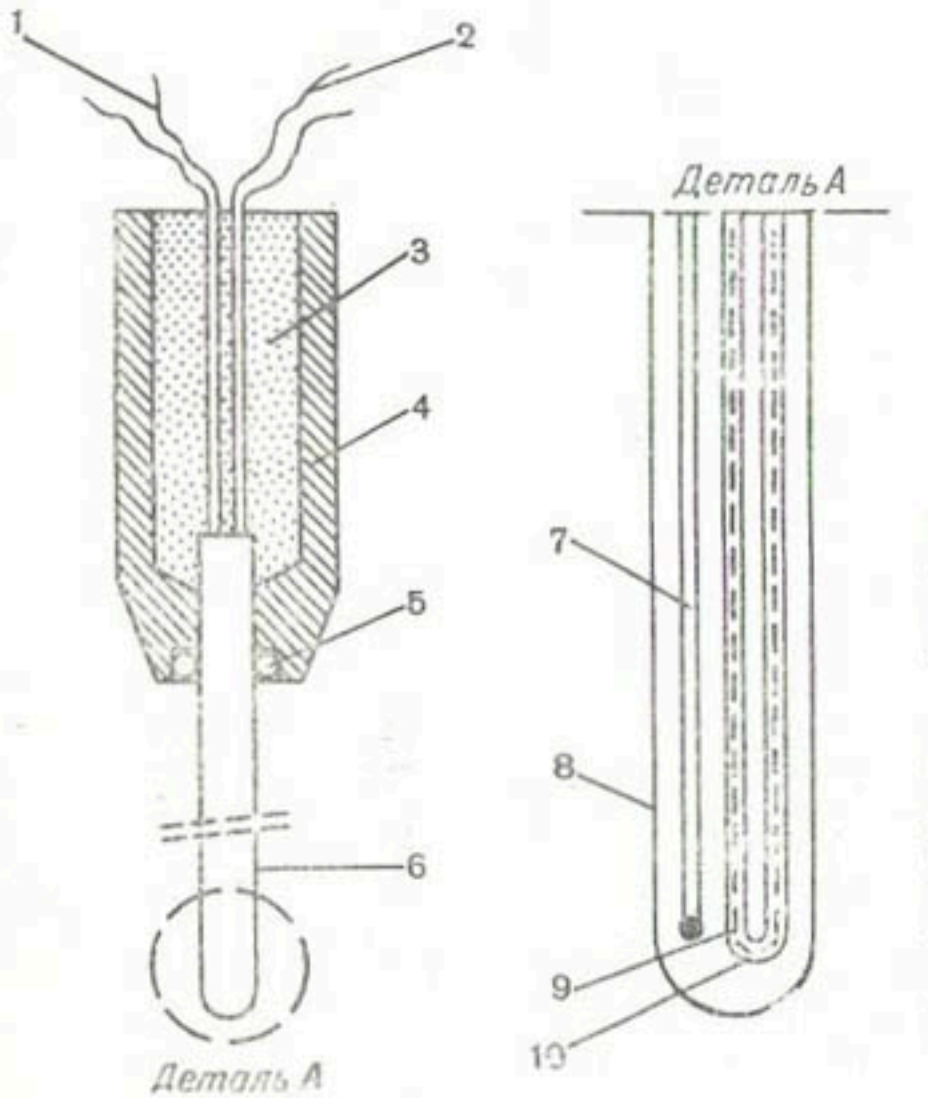


Рис. 30. Схема термозонда для определения влажности почвы по теплофизическим характеристикам.

1 — выводы измерителя температуры, *2* — выводы нагревателя, *3* — полимерная смола, *4* — корпус (пластмасса), *5* — гайка, *6* — латунная трубка, *7* — измеритель температуры (термопара или термосопротивление), *8* — латунная трубка (внешний диаметр 2 мм, толщина стенки 0,06 мм), *9* — нагреватель, *10* — стеклянный капилляр.

чувствительных элементов используются термопары или полупроводниковые термосопротивления. Последние обеспечивают более высокую чувствительность измерительной аппаратуры и дистанционность измерений (благодаря высокому собственному сопротивлению датчиков).

При работе с термовлагомером влажность почвы может быть определена по показаниям прибора, отмечаемым через 1,5—2 мин. после включения нагревателя. Типичные калибровочные кривые прибора для различных почв приведены на рис. 31.

Исследование работы термовлагомеров показало, что точность измерения сильно зависит от теплового контакта зонда с почвой, плохо воспроизводимого в полевых условиях. Аналогичные недостатки отмечаются и в приборах, измеряющих электрическое сопротивление почвы.

Улучшение характеристик по стабильности измерений и диапазону определяемых параметров было достигнуто при использова-

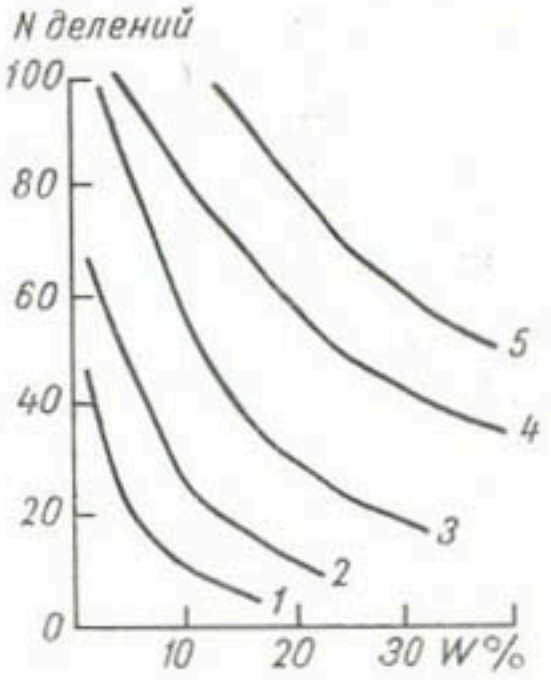


Рис. 31. Градуировочные характеристики термовлагомера для определения влажности (в процентах к весу).

1 — кварцевый песок, *2* — легкий суглинок, *3* — чернозем, *4* — дробленый керамзит, *5* — чернозем (датчик с пористой оболочкой).

нии термозонда с пористым блоком-оболочкой. Схема такого датчика дана на рис. 32. Поскольку наличие солей в почве практически не сказывается на работе термовлагомера, к материалу пористого блока не предъявляется особых требований. Структура и размеры пор оболочки подбираются, исходя из необходимости получения максимальной чувствительности в заданном интервале влажности.

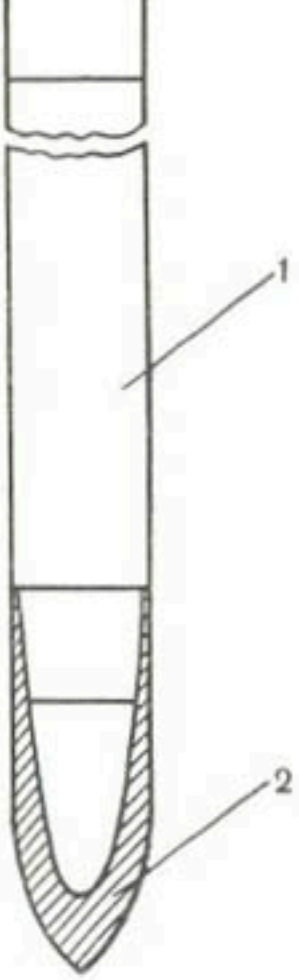


Рис. 32. Схема датчика термовлагопотенциометра.

1 — датчик термовлагомера, *2* — микропористая гильза.

При наличии пористого блока термовлагомер измеряет сосущую силу (капиллярный потенциал) почвы и может быть тарирован в соответствующих единицах (рис. 33). По аналогии с гипсовыми блоками градуировка термовлагопотенциометра может быть трансформирована в форму зависимости показаний от количества доступной растению влаги (аналогично рис. 27 *б*). Как уже отмечалось, приборы этого класса универсальны и не требуют градуировки непосредственно для почвы, на которой производится измерение.

Преимущества термовлагопотенциометров по сравнению с электровлагопотенциометрами заключаются в том, что первые нечувствительны к солевому составу почвенной влаги и обладают бóльшим сроком службы, так как для пористого чехла используются более стойкие нерастворимые керамики.

Вместе с тем необходимо отметить некоторые недостатки термовлагопотенциометров. В первую очередь — большая длительность времени измерений и сложность автоматизации процесса измерений. В практических условиях некоторые неудобства составит и необходимость четырехпроводной линии для подключения датчика к измерителю при дистанционных измерениях. Известные трудности представляет унификация пористых блоков по характеристикам поглощения влаги. В связи с этим требуется индивидуальная градуировка каждого датчика, но этот недостаток характерен для

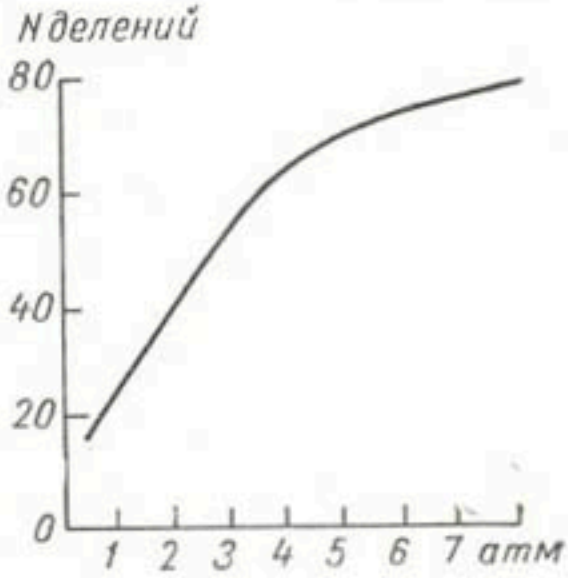


Рис. 33. Градуировочная характеристика прибора для определения потенциала влаги в почве (в атмосферах).

всех приборов с пористыми блоками. При выпуске больших количеств датчиков возможна их группировка в серии с одинаковыми характеристиками.

§ 10. Взаимодействие радиоактивного излучения с почвенной влагой

Принципиально разработан и практически используется ряд ядерных методов для измерения влагосодержания почвы [4, 11]. В тонких исследованиях нашел применение метод ядерного магнитного резонанса, позволяющий оценивать структурные связи влаги в твердых веществах и жидкостях. Что касается измерений влажности почвы, то до последнего времени для этой цели использовались радиоактивные излучения.

Как известно, изменение интенсивности излучения за счет поглощения описывается следующим законом:

$$I = I_0 \exp(-\mu d), \tag{II.25}$$

где I_0 и I — интенсивность излучения соответственно в начале и в конце поглощающего слоя толщиной d. Характеристикой материала является линейный коэффициент поглощения μ.

Иногда более удобно определять степень поглощения по массе вещества, через которую прошло излучение.

$$I = I_0 \exp(-\mu_м d_м), \tag{II.26}$$

где $\mu_м$ и $d_м$ — массовый коэффициент поглощения и массовая толщина слоя материала.

Величина поглощения μ зависит от характера излучения и от физических характеристик вещества (плотности, атомного номера и т. п.). Фактически для целей влагометрии можно использовать только γ-излучение и нейтронные потоки, так как и α- и β-излучение поглощаются в относительно тонких слоях материала. Это связано с тем, что α- и β-лучи представляют собой потоки заряженных частиц, непосредственно взаимодействующих с ядрами и электронами атомов среды. Эффективные сечения, определяющие вероятность взаимодействия частицы со средой, в случае заряженных частиц значительно больше, чем для электрически нейтральных излучений (γ и нейтронного). Для заряженных частиц существенное значение имеет взаимодействие зарядов, проявляющееся на значительно бóльших расстояниях, чем это наблюдается при механических взаимодействиях, определяющих рассеяние нейтральных частиц и фотонов.

Для γ-излучения ослабление интенсивности обусловливается в основном взаимодействием γ-квантов с внешними электронами атомных оболочек. Излучение с не очень большой энергией фотонов, наиболее активно взаимодействующее со средой, ослабляется, в основном за счет процесса фотоэффекта, при котором вся энергия γ-кванта передается электрону. Одновременно наблюдается процесс компоновского рассеяния, при котором электрону передается часть энергии фотона, изменяющего при этом частоту излучения и направление движения. При больших энергиях γ-квантов появляются дополнительные источники ослабления излучения: образование пар электрон-позитрон, взаимодействие ядра с γ-квантом. Эти процессы начинают проявляться при превышении некоторой пороговой энергии излучения.

Изменение характеристик нейтронного потока, замедление и изменение направления движения частиц, происходит за счет механических процессов упругого взаимодействия нейтронов с ядрами атомов. Нейтроны наиболее эффективно взаимодействуют с легкими ядрами (в первую очередь с водородом).

Для измерения влагосодержания почвы используется зависимость от состава среды процессов поглощения γ-лучей и рассеяния γ-лучей и нейтронов. В случае использования γ-излучения эффект проявляется в наличии зависимости ослабления интенсивности излучения от плотности и влажности почвы и может быть зафиксирован по относительному изменению поглощения излучения образцами различного влагосодержания.

Если рассматривать поглощение излучения в элементах, входящих в состав влажной почвы, то

$$\left.\begin{aligned} I_{вп} &= I_0 \exp\left[-\rho_{вп} d \left[W' (\mu_в - \mu_{сп}) + \mu_{сп}\right]\right] \\ I_в &= I_0 \exp\left(-\mu_в d\right) \\ I_{сп} &= I_0 \exp\left(-\mu_{сп}\rho_{сп} d\right) \end{aligned}\right\} \qquad (II.27)$$

здесь индексы «вп» и «сп» относятся к влажной и сухой почве соответственно, а индекс «в» — к воде. Массовый коэффициент поглощения влажной почвы

$$\mu_{вп} = W'\mu_в + (1 - W')\,\mu_{сп} = W'(\mu_в - \mu_{сп}) + \mu_{сп}, \qquad (II.28)$$

причем весовая влажность W' выражена в относительных единицах по отношению к весу влажной почвы.

Полагая, что от увлажнения не меняются размеры образца (что не совсем верно, так как явления «усадки» и «разбухания» зафиксированы при исследованиях, хотя абсолютные значения изменений объема невелики) можно записать для объема почвы V:

$$W' = \frac{V\rho_{вп} - V\rho_{сп}}{V\rho_{вп}} \qquad (II.29)$$

и

$$\rho_{вп} = \frac{\rho_{сп}}{1 - W'}. \qquad (II.30)$$

Несложные преобразования позволяют из системы (II.27) получить соотношение

$$\ln \frac{I_{сп}}{I_{вп}} = \rho_{сп}\mu_в W d, \qquad (II.31)$$

где W — весовая влажность, выраженная в частях по отношению к весу сухой почвы. В соответствии с (II.31) для определения влажности почвы необходимо знать изменение интенсивности γ-излучения, проходящего через влажную почву, по отношению к интенсивности излучения, проходящего через такой же слой сухой почвы. Аналогичные (II.31) соотношения могут быть получены при использовании эталонного образца заданной влажности. Соответственно в них входит отношение излучения, прошедшего через рабочий образец почвы, к излучению, прошедшему такой же слой почвы с эталонной влажностью.

Другой вариант γ-метода позволяет одновременно измерять влажность и плотность почвы по изменению интенсивностей излучения двух источников с малой и средней энергией. Его реализация основывается на том, что взаимодействие излучения с веществом зависит от строения электронных оболочек атома. При этом поглощение мягкого излучения в основном определяется тяжелыми компонентами среды, а поглощение среднего по жесткости излучения обусловлено главным образом более легкими элементами.

При взаимодействии потока быстрых нейтронов происходят уменьшение энергии и изменение направления движения частиц за счет упругого и неупругого рассеяния, а также реакции с захватом нейтронов атомными ядрами среды. При этом реакции захвата проявляются в основном с нейтронами малых энергий, а рассеяние доминирует при взаимодействии с ядрами нейтронов с высокой кинетической энергией. Эффективное сечение взаимодействия,

зависящее от энергии нейтронного потока, определяет интенсивность процессов в облучаемом материале. Значения этого параметра для основных элементов, входящих в состав почвы, приведены в табл. 11 [4].

Таблица 11

Нейтронные эффективные сечения взаимодействия (10^{-24} см^2/атом)

Элемент	Рассеяние быстрых нейтронов (2,5 Мэв)	Рассеяние медленных нейтронов (0,025 Мэв)	Захват медленных нейтронов (0,025 Мэв)	Элемент	Рассеяние быстрых нейтронов (2,5 Мэв)	Рассеяние медленных нейтронов (0,025 Мэв)	Захват медленных нейтронов (0,025 Мэв)
Водород	2,5	81,5	0,33	Алюминий	2,5	1,5	0,23
Бор	—	7,5	755	Кремний	3,2	2,4	0,13
Углерод	1,6	5,5	3,2	Хлор	2,7	16	31,6
Азот	1,0	11,4	1,9	Калий	3,8	2,2	1,97
Кислород	1,5	4,2	0,0	Кальций	4,9	3,2	0,43
Натрий	2,6	3,4	0,5	Железо	3,0	11,8	2,53
Магний	2,0	3,7	63				

Возможность применения нейтронного метода для оценки влагосодержания обусловлена большой разницей в эффективных сечениях взаимодействия между водородом и остальными элементами почвы. Очевидны недостатки и источники ошибок нейтронного метода. Рассеяние происходит не только на водороде свободной воды, но и на атомах, входящих в состав химических соединений и гидратных комплексов связанной влаги. Причем часть влаги, регистрируемой нейтронным методом, не может быть измерена с помощью других методов (например, кристаллизационная вода). Это необходимо иметь в виду при интерпретации результатов измерений и расчетах дефицита влаги по данным нейтронных влагомеров.

Практические аспекты использования нейтронного метода для определения влажности почвы базируются на экспериментальных данных, так как, несмотря на очевидность и простоту самой идеи, попытки теоретического вывода основных зависимостей рассеяния нейтронов не дали удовлетворительных результатов.

Как видно из табл. 11, помимо экспериментальных погрешностей, источником ошибок измерения может оказаться изменение концентрации некоторых распространенных в почве элементов (N, Mg, Cl, Fe), а также микроэлементов (B). Для примера эффективности подобных воздействий на рис. 34 приведена зависимость уменьшения скорости счета от содержания железа в образце. Поэтому, несмотря на то что нейтронный метод по существу является абсолютным, приходится прибегать к тарировке датчиков на образцах исследуемой почвы. При подобной тарировке автоматически

учитывается влияние минерального состава и связанной влаги на характеристики нейтронного влагомера. Миграция элементов в течение вегетационного периода не должна вносить существенных изменений в данные. На рис. 35 приведена характеристика нейтронного влагомера для глины. Основная градуировка (полевая, кривая *2*) проводилась в лаборатории по трем образцам глины, взя-

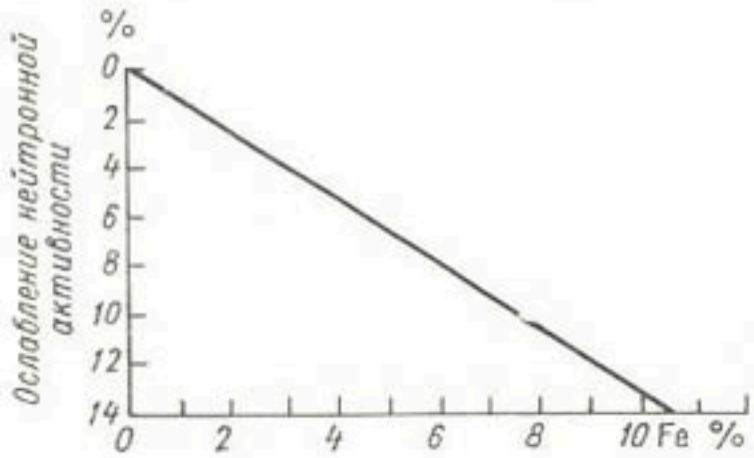


Рис. 34. Зависимость поглощения нейтронов от содержания в почве железа.

тым на поле из траншей и пробуренных отверстий. На том же графике приведена кривая «эталонной» градуировки (*1*) по специально приготовленным смесям на основе песка. Как показал ана-

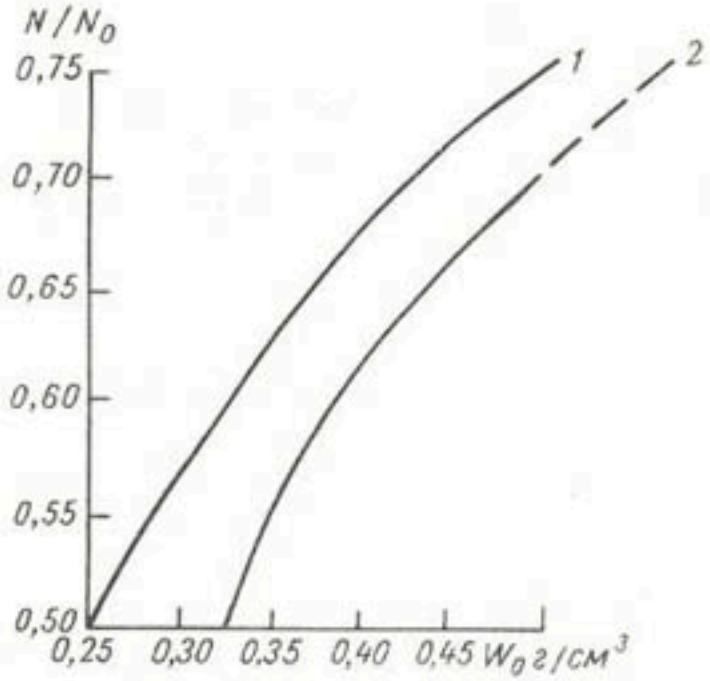


Рис. 35. Градуировочные кривые нейтронного влагомера: эталонная, полученная в лаборатории (*1*), и полученная в полевых условиях (*2*).

лиз, расхождение эталонной кривой и фактической градуировки связано в этом случае с относительно высокой концентрацией калия и железа в исследуемом материале.

§ 11. Радиоактивные методы определения влагосодержания почвы

Весовые, электрические, теплофизические методы оценки влагосодержания почвы обладают общим недостатком, существенно затрудняющим расчет влагозапасов сельскохозяйственного поля. По характеру измерений это точечные методы, и полученные значения параметров влагосодержания локализованы в небольшом объеме вокруг точки взятия пробы или установки датчика.

Из всех употребляемых методов только радиоактивные не обладают указанным недостатком и дают возможность определять средние значения влагосодержания почвы для значительного объема. Благодаря этому, а также некоторым другим особенностям радиоактивные методы измерений находят все большее применение не только в научных исследованиях, но и в практике агрономических измерений.

Радиоактивные методы могут быть применены в двух типах измерительных систем [4, 11, 17]. Одна из них предусматривает разделение в пространстве источника радиации и детектора — схема просвечивания. В этом случае детектированный сигнал пропорционален длине пути луча между источником и детектором (базе прибора) и величине влажности. Измерение осуществляется по излуче-

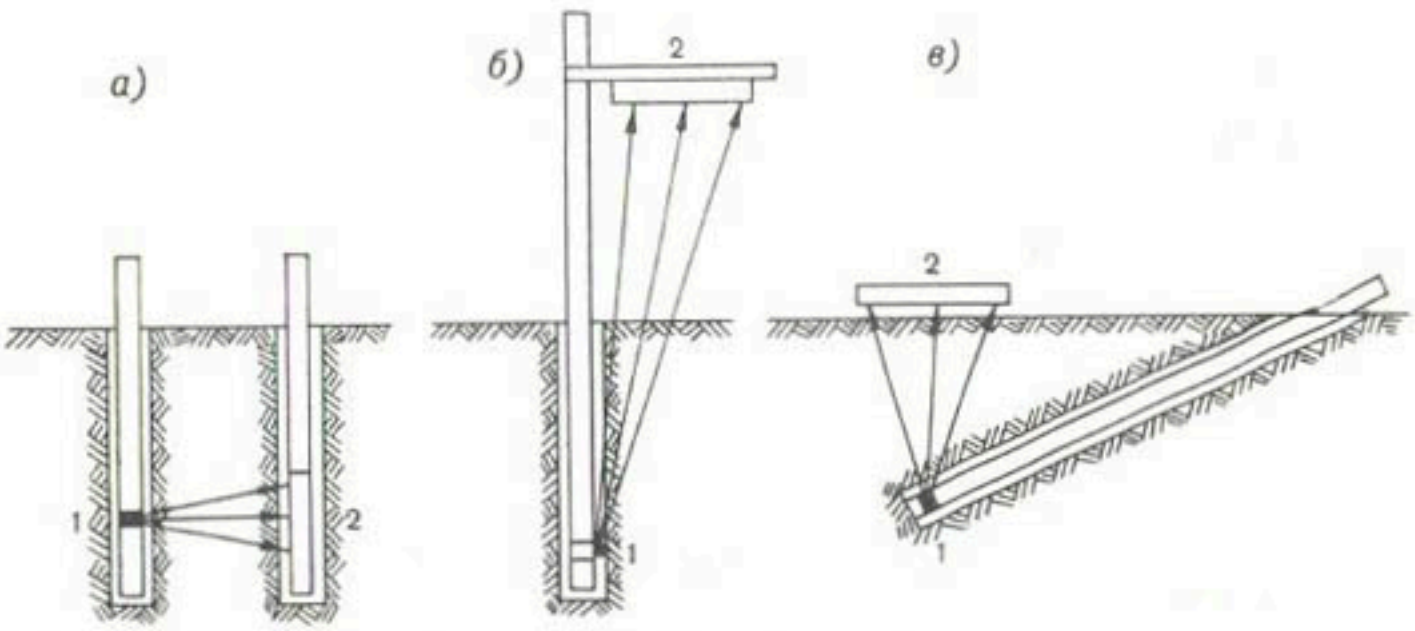


Рис. 36. Схемы размещения радиоактивных датчиков для реализации методов просвечивания.

а — глубинные зонды, *б* и *в* — поверхностные зонды. *1* — источник излучения, *2* — детектор радиоактивного излучения.

нию источника, приходящему к детектору, который не реагирует на излучение с характеристиками, измененными за счет взаимодействия с веществом. При использовании схемы просвечивания база прибора задает масштаб пространственного осреднения.

Типичные схемы расположения источника и детектора приведены на рис. 36. До настоящего времени практическое применение нашел только гаммаскопический метод, в котором использована схема просвечивания. О применении нейтроноскопии для измерения влажности почвы данных нет.

Большее распространение получила вторая схема измерений. При такой схеме источник излучения и детектор размещаются в одном зонде, а индикация влажности производится по излучению, измененному в результате взаимодействия со средой. Принимаются меры, предупреждающие фиксацию прямого излучения источника детектором, который воспринимает рассеянное мягкое гамма-излучение или нейтроны малой энергии (тепловые). Детектированный

сигнал пропорционален количеству рассеивающего элемента (влаги) в пределах сферы действия излучателя. Поскольку в процессе рассеяния происходит многократное взаимодействие излучения с молекулами воды, а для получения результирующего эффекта необходимо определенное число взаимодействий, сфера действия излучателя зависит от количества рассеивающих центров в единице объема и растет при уменьшении их концентрации.

Таким образом, при применении измерительной схемы рассеяния радиоактивного излучения величина области пространственного осреднения зависит от значения влагосодержания и растет при снижении влажности. На рис. 37 показан порядок величин изменений радиуса сферы действия нейтронного влагомера, для которого этот эффект выражен заметно. Данные эти получены на моделях огра-

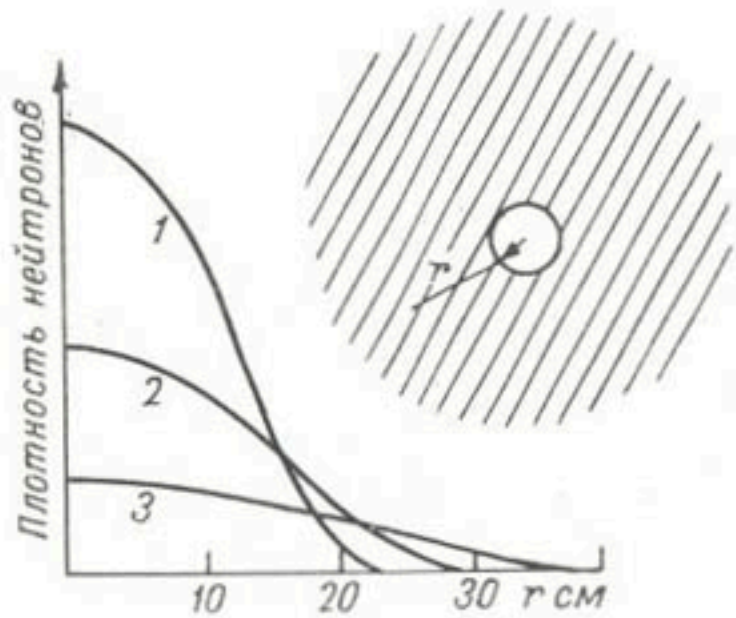


Рис. 37. Влияние влажности почвы на распределение тепловых нейтронов.

Объемная влажность: *1* — 50%, *2* — 25%, *3* — 10%.

ниченного размера с отражающими стенками блока модели. Радиус сферы рассеяния нейтронов для воды порядка 15—17 см.

Фактор пространственного осреднения имеет значение для организации наблюдений, так как в зависимости от фона влажности почвы необходимо менять число измерительных точек для получения надежного профиля влажности.

Ввиду того что радиоактивные влагомеры фиксируют среднее значение влажности для значительного объема почвы, при проведении наблюдений вводятся ограничения на расположение зонда.

Наибольшее применение находят скважинные зонды, позволяющие измерять влажность во всем активном слое почвы. При использовании скважинных зондов установка источника излучения в поверхностном слое почвы (на глубине меньше радиуса сферы действия) приводит к существенным ошибкам измерений за счет утечки излучения в воздух. Это вызывает уменьшение регистрируемого излучения и соответственное занижение величины влажности почвы. Поэтому для измерений в пахотном слое почвы необходимо использовать специальные поверхностные датчики. Источник излучения поверхностного зонда размещается непосредственно на поверхности почвы. Для исключения утечки излучения в воздух и влияния параметров воздуха на результат измерений поверхност-

ный датчик нейтронного влагомера снабжается парафиновым экраном.

Несмотря на предупредительные меры, поверхностные приборы более чувствительны к внешним воздействиям, нарушающим воспроизводимость результатов измерений.

Применяемые при реализации метода рассеяния схемы расположения источников и детекторов приведены на рис. 38. Эксперименты показали, что наиболее эффективны схемы *а* и *б*, в которых источник излучения заключен между двумя детекторами. Такое расположение детекторов позволяет фиксировать рассеянное излучение из всей активной сферы измерения. Практически для скважинных датчиков эти схемы редко применяются, так как детекторы излучения обычно имеют довольно большую длину (как газо-

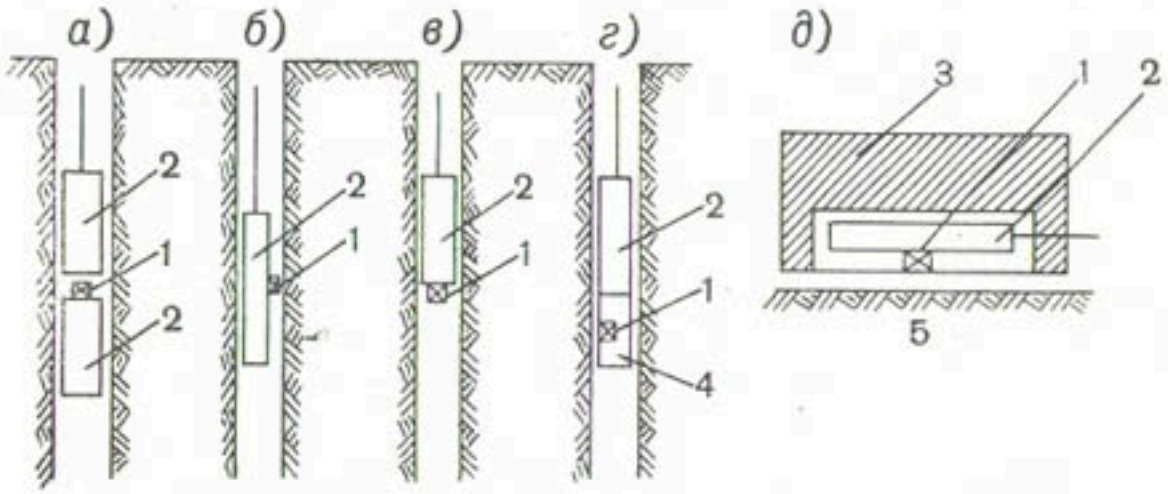


Рис. 38. Схемы радиоактивных датчиков влажности почвы при реализации методов рассеяния.

а, б, в, г — глубинные зонды, *д* — поверхностный зонд. *1* — источник радиоактивного излучения, *2* — детектор радиоактивного излучения, *3* — поглотитель, *4* — среда, изменяющая характеристики излучения (уменьшающая энергию), *5* — почва.

вые счетчики, так и сцинцилляционные регистраторы с фотоумножителями).

При реализации таких схем существенно возрастает необходимая глубина скважины. В этом случае подключение детекторов к кабелю затруднено.

Датчик с торцевым расположением источника (типа *в* или *г*) используется в большинстве скважинных зондов. Эффективность измерений в этом случае ниже, чем для схемы *а*, но это компенсируется простотой технических решений конструкции датчика.

Центральное расположение источника — схемы *а* и *д* — используется преимущественно в поверхностных зондах. Между источником и детектором обязательно устанавливается экран, значительно ослабляющий влияние прямого излучения источника на детектор. В скважинных зондах наличие экрана приводит к нежелательному частичному затенению детектора от рассеивающей среды.

Схема *г* практически почти не применялась. Здесь источник размещен в тормозящей среде, обеспечивающей сдвиг характеристик излучения (в частности, энергии частиц или фотонов) в область

максимальной чувствительности к содержанию влаги в почве. Теоретически схему можно использовать для скважинных и поверхностных зондов при измерениях и нейтронным и гамма-методом. Наибольшую эффективность должно дать применение такой схемы для нейтронного зонда, так как в этом случае, как правило, энергия генерируемых нейтронов слишком велика. В качестве замедлителя можно использовать чехол из материала, содержащего водород (парафин, оргстекло, полистирол).

Вследствие значительного пространственного осреднения для радиоактивных влагомеров неприменимы основные положения выбора образцов, используемые во всех предыдущих случаях. Это связано также и с тем, что структура и минеральный состав почвы относительно слабо сказываются на результатах измерений при условии одинакового содержания влаги в единице объема.

При работе с радиоактивными влагомерами в выбранных местах поля с помощью буров подготавливаются постоянные скважины, в которых устанавливаются тонкостенные алюминиевые трубы. Для гамма-влагомеров можно использовать трубы из пластика. В процессе измерений рабочий блок прибора устанавливается в трубе на заданной глубине. Как правило, зонды устанавливаются в скважинах только на момент измерения, что дает возможность с помощью одного зонда проводить измерения на больших площадях.

Остановимся несколько подробнее на основных элементах радиоактивных влагомеров. Источники излучения выбираются с учетом следующих основных параметров: интенсивности излучения, наличия паразитных радиоактивных излучений и возможности их блокирования, срока работы без тарировки. Последний фактор определяется периодом полураспада радиоактивных изотопов, применяемых в качестве источников.

Исходя из теоретических расчетов, в источниках гамма-излучения для влагометрии наиболее выгодно применять среднее по энергии (порядка 0,2—0,5 Мэв) излучение. В существующих приборах обычно используются источники высокой энергии (1—3 Мэв) на базе кобальта (Co^{60}) и цезия (Cs^{137}). Значительно реже применяются препараты радия. Активность источников гамма-излучения обычно лежит в пределах 5—10 мкюри.

В качестве источников быстрых нейтронов обычно используются комбинированные элементы из альфа-эмиттеров в сочетании с бериллием. При выборе материала особое внимание уделяется недопущению паразитного гамма-излучения эмиттера, нежелательного с точки зрения помех и безопасности обслуживания аппаратуры. По уровню паразитного гамма-излучения не вполне удачны наиболее часто применявшиеся источники нейтронов из естественных радиоактивных материалов (радий-бериллий, полоний-бериллий, актиний-бериллий). Удовлетворительными характеристиками обладают плутоний-бериллиевые источники, практически не имеющие паразитного гамма-излучения.

Распространенные источники обеспечивают получение потока нейтронов с энергией 1—5 Мэв при интенсивности 10^4—10^5 частиц в секунду. Активность применяемых генераторов 5—20 мкюри.

Анализ показал, что при решении практических задач влагометрии оптимальная интенсивность нейтронных источников с учетом требований точности, экономичности и безопасности не превышает 1—2 мкюри при энергии нейтронов 0,5—1,0 Мэв и плотности потока $1—2 \cdot 10^4$ нейтронов в секунду. Лабораторная проверка показала правильность теоретического анализа.

Общие требования к детекторам излучения ограничиваются чувствительностью их в заданном диапазоне энергий излучения и помехоустойчивостью к паразитному излучению. Эксплуатационные требования сводятся к стабильности и возможности батарейного питания (желательно низкое напряжение при минимальном расходе энергии). Правильный выбор детекторов из большого числа выпускаемых промышленностью позволяет удовлетворить эти требования, за исключением величины напряжения питания. Как правило, для электропитания детекторов необходимо напряжение порядка сотен вольт (до 1500 в).

В приборах с индикацией влажности по гамма-излучению в качестве детекторов используются счетчики Гейгера. Для детектирования тепловых нейтронов в современных приборах применяются пропорциональные счетчики на основе бора и сцинцилляторы с йодистым литием в сочетании с фотоумножителями. В некоторых случаях для повышения чувствительности аппаратуры используется экранировка счетчиков фольгой из материала, вступающего в реакцию с медленными нейтронами (чаще всего используется фольга из кадмия).

Почти все применяемые детекторы реагируют на прямое паразитное гамма-излучение источников. В связи с этим зонды снабжаются соответствующим образом рассчитанной защитой (промежуточными экранами), разделяющей источник излучения и детектор.

Определение влажности в радиоактивных влагомерах осуществляется по интенсивности излучения, регистрируемого детектором. Измерители скорости счета, применяемые для этой цели, должны быть рассчитаны на большие скорости счета без насыщения в тракте передачи импульсов (для нейтронов до 25 000 импульсов в секунду). Кроме того, выходные счетчики радиоактивных влагомеров должны иметь блоки селекции импульсов с регулировкой по уровню, с помощью которых можно отделять паразитный фон излучения от полезного сигнала.

Разработанная и применяемая для полевых измерений аппаратура рассчитана на электропитание от батарей или бортовой сети автомашины. Но имеются и стационарные приборы с питанием от сети.

При использовании радиоактивных методов определения влагосодержания в некоторых случаях возникает необходимость

в одновременном определении плотности почвы. Для применения гамма-методов это обусловлено значительной погрешностью измерений, связанной с изменением плотности среды. Что касается нейтронной аппаратуры, на работу которой плотность почвы не оказывает непосредственного влияния, то здесь приходится прибегать к определению плотности для приведения измеренных величин к обычно используемым параметрам (переход от объемной влажности к весовой).

Процесс рассеяния нейтронов обусловливает зависимость числа тепловых нейтронов от содержания влаги в единице объема среды (W_0 г/см^3). Для определения весовой влажности почвы, фиксируемой по контрольным весовым методикам, необходим пересчет по формуле (II.14). Такая обработка возможна при определении плотности влажной почвы.

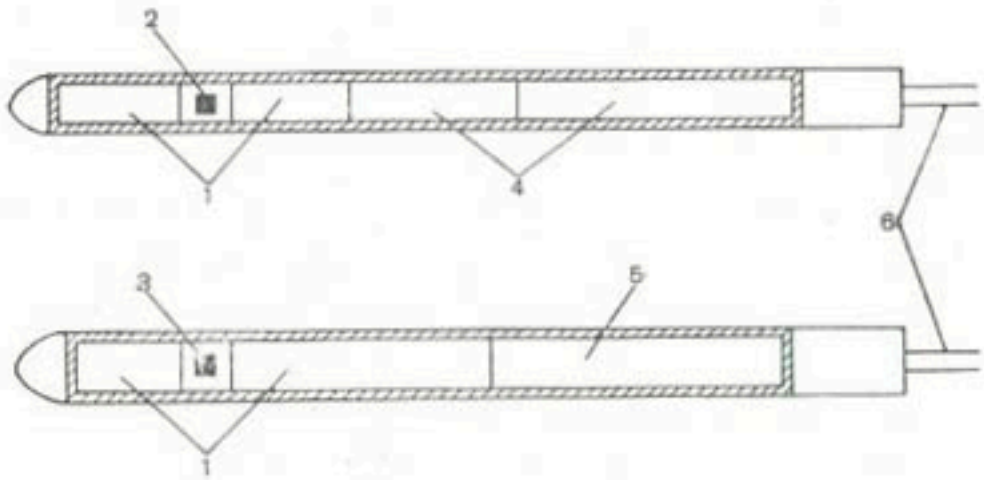


Рис. 39. Зонды гамма-нейтронного влагомера-плотномера почвы.

1 — свинцовые экраны, *2* — источник нейтронов, *3* — источник γ-излучения, *4* — газовые счетчики нейтронов (фтористые), *5* — счетчик Гейгера, *6* — кабель.

В сочетании с нейтронным влагомером для измерений плотности обычно используется гамма-плотномер. Практически реализованы два типа измерительной аппаратуры: с разделенными зондами для влажности и плотности и с совмещенным зондом.

Разделенные зонды изготавливаются в одинаковых вариантах конструкции. Это обеспечивает возможность поочередного введения зондов в измерительные скважины и измерения обоих параметров в идентичных условиях. Схемы устройства таких зондов приведены на рис. 39.

В случае совмещения нейтронного и гамма-зондов (плотномера) в одном датчике могут использоваться раздельные источники излучения, вынесенные на различные расстояния от общего детектора. Схема такого датчика приведена на рис. 40. И в скважинном, и в поверхностном датчиках используется сцинцилляционный детектор излучения, а разделение сигналов детектора от нейтронов и гамма-квантов производится за счет селекции по уровню выходных импульсов детектора.

Совмещенный зонд может быть реализован и в другом варианте, в котором паразитное гамма-излучение радий-бериллиевого источника используется для измерений плотности. Соответственно расположенные детекторы воспринимают раздельно медленные нейтроны и рассеянное гамма-излучение. Зонды такого типа обладают значительным фоновым излучением.

Поскольку геометрия пространства, рассеивающего излучение, различна для скважинных и поверхностных зондов, градуировка этих зондов производится раздельно в условиях, приближенных к эксплуатационным. Типовые градуировочные характеристики поверхностного и скважинного зондов приведены на рис. 41. Градуировка для каждой модификации зонда индивидуальна, так как

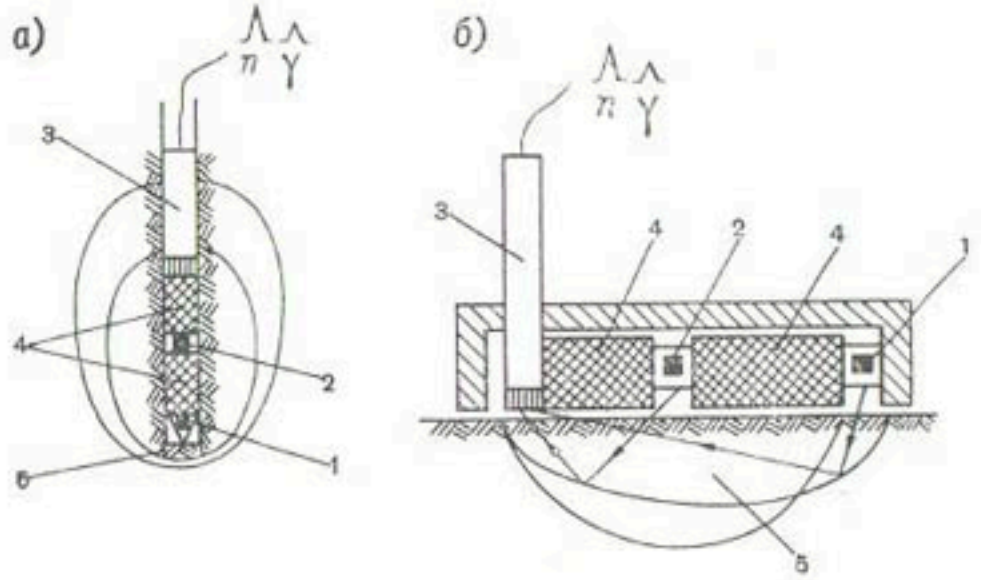


Рис. 40. Совмещенные зонды гамма-нейтронного влагомера-плотномера.

а — глубинный зонд, *б* — поверхностный зонд. *1* — источник γ-излучения, *2* — источник нейтронов, *3* — сцинцилляционный детектор излучения с фотоумножителем, *4* — свинцовые экраны, *5* — почва.

чувствительность прибора зависит от конструкции датчиков (расстояния между источником и детектором, размеров детектора, интенсивности источника и т. п.). Для нейтронного влагомера точность измерений и порог чувствительности для указанных зондов также будут различны.

Оценка точности радиоактивных влагомеров осложнена еще и тем, что погрешность измерений зависит от величины влажности (при росте влажности ошибка уменьшается). Ошибка измерений определяется статистической погрешностью счета импульсов, погрешностью электронных устройств преобразования информации и погрешностью градуировки, включающей фактор неравномерного распределения влаги в почве в реальных условиях. Этот фактор обычно не учитывается при тарировке датчиков на эталонах. С точки зрения оценки доступной растению влаги возможна дополнительная погрешность, которая связана с систематической ошибкой, обусловленной наличием связанной влаги в почве (водород в составе органических соединений и элементов корневой

системы, кристаллизационная влага и т. п.). Суммарная погрешность определяет порог чувствительности аппаратуры — минимальную величину параметра, которую можно измерить.

Экспериментальные исследования точности показали, что погрешность измерений поверхностного зонда приблизительно вдвое больше, чем скважинного. Зависимость погрешности от объемной влажности, характеризующая ход изменений точности нейтронного влагомера, приведена на рис. 41 *в*. Погрешность определена для двух величин отрезков времени счета (1 минута и 10 минут). Эти характеристики показывают, что, помимо умень-

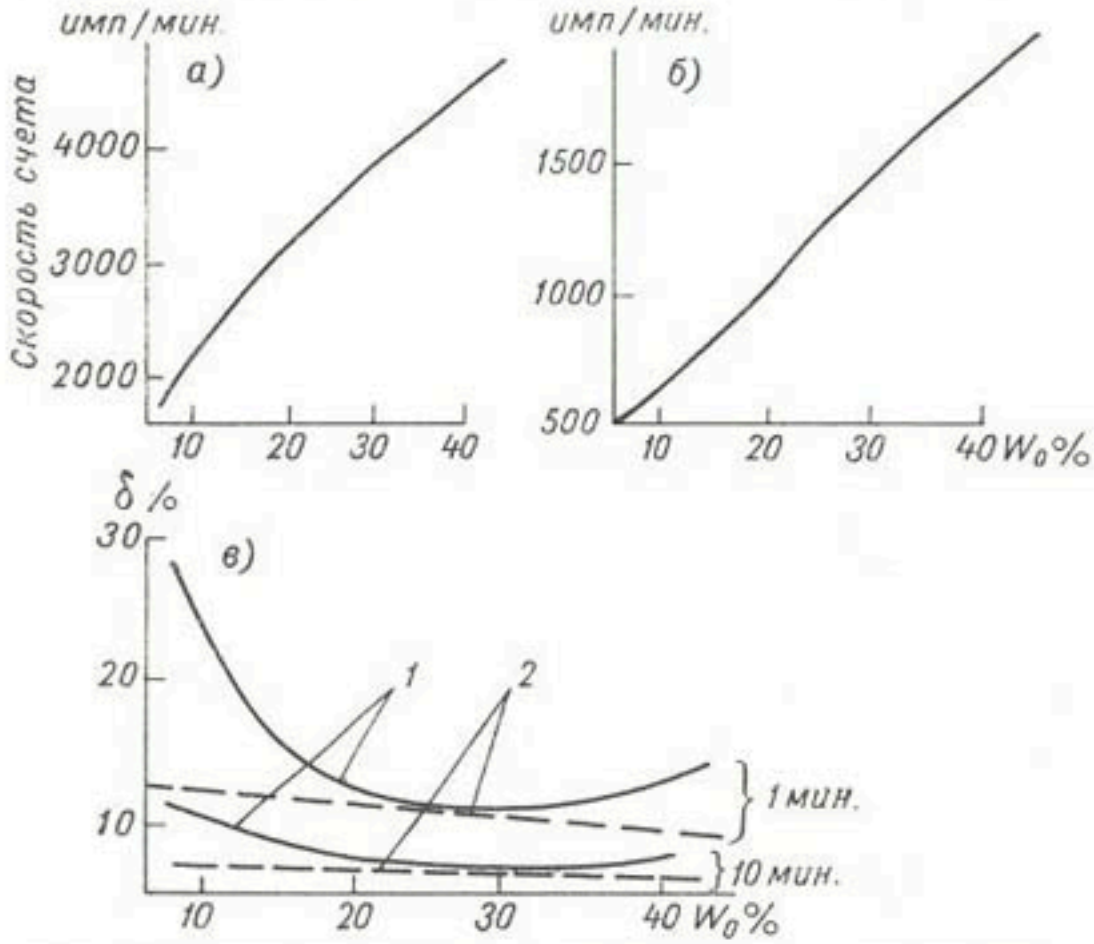


Рис. 41. Характеристики глубинного (*а*) и поверхностного (*б*) зондов и сравнительная характеристика погрешности (*в*).

1 — поверхностный зонд, *2* — глубинный зонд.

шения статистической ошибки (наиболее просто достигаемого путем увеличения времени счета), необходимо также снижение остальных составляющих погрешности в тех случаях, когда измерения влагосодержания должны быть точными. В результате исследований получено, что даже при тщательной лабораторной тарировке датчиков суммарная ошибка нейтронного влагомера не может быть ниже 0,5—1% объемной влажности почвы.

На первых этапах разработки и применения радиоактивных влагомеров предполагалось, что эти методы, особенно нейтронный, универсальны и позволяют осуществлять абсолютные измерения влажности почв. Но по мере накопления фактического материала выявилось, что реальные полевые условия оказывают существенное воздействие на работу подобной аппаратуры. В частности, ра-

нее обсуждалось влияние плотности почвы и ее химического состава на результат измерений влагомером. В связи с этим в настоящее время общепризнана необходимость тарировки радиоактивных датчиков непосредственно на образцах почвы данного исследуемого поля. Это обстоятельство существенно снижает эффективность использования радиоактивных измерителей, так как градуировка их представляет довольно сложную задачу. Такую работу производят как в полевых, так и в лабораторных условиях.

Полевая градуировка осуществляется при установке зонда на месте измерений. Для определения фактической влажности почвы берутся пробы в необходимой повторности для измерений методом сушки. Такая тарировка существенно затрудняется при неоднородности плотности или состава почвы в месте установки зонда. Воспроизводимость полевой градуировки невелика.

В лаборатории градуировка ведется на почвенных моделях (иммитаторах почвы). В данном случае сложность градуировки связана с необходимостью создания значительного по объему (более 1 м^3) образца с постоянной плотностью, влажностью и составом. Как уже отмечалось, минимально допустимый объем образца зависит от диапазона влажности, в котором должна производиться тарировка. При наличии такого образца лабораторная тарировка позволяет получить хорошо воспроизводимые зависимости между влажностью образца и скоростью счета индикатора.

Градуировка нейтронных влагомеров может вестись и на иммитаторах, в которых реальный минеральный каркас почвы заменяется наполнителем со стабильными характеристиками, а добавки материала, содержащего водород, легко регулируются. Одно из важных требований к иммитаторам — равенство плотности среды фактическому значению этого параметра для почвы.

В качестве наполнителя в моделях в основном применяется песок, иногда в сочетании с бентонитовой глиной. Помимо воды, для иммитаторов используется глюкоза и парафин. Смеси составляются при осаждении песка в воде с последующим вибрационным уплотнением и удалением избытка влаги. В подобных иммитаторах удавалось добиваться однородности образца по плотности и распределению воды.

Помимо иммитаторов на твердой основе, употребляются и жидкие эталоны, обычно реализуемые с помощью материалов, поглощающих нейтроны. Такие эталоны, в частности, делаются на основе борной кислоты. Они значительно проще в изготовлении и в эксплуатации.

Следует отметить, что любые типы иммитаторов более пригодны для контроля стабильности градуировки, чем для первичной тарировки приборов, так как они не дают возможности оценивать ошибки измерения, связанные с химическим составом реальной почвы.

При оценке радиоактивных методов определения влажности почвы следует отметить следующие основные достоинства

и недостатки их. Радиоактивные методы позволяют определять среднюю влажность почвы в значительном объеме, что для оценки влагообеспеченности сельскохозяйственных полей весьма важно; к тому же такая оценка позволяет существенно уменьшить необходимую повторность измерений. При проведении специальных исследований такие характеристики пространственного осреднения неудобны и ограничивают возможности применения приборов, так как разрешающая способность датчиков недостаточна для получения точных профилей изменения влагосодержания с глубиной.

Радиоактивные приборы имеют цифровой отсчет, а сигналы с датчиков удобны для передачи в телеизмерительных системах. Радиоактивные методы не обладают гистерезисом, в отличие от методов определения влажности, в которых использованы пористые тела. Один комплект датчиков в составе передвижных установок может быть многократно использован для измерений влажности почвы на больших площадях.

Для нейтронного метода, в тех случаях, когда необходимы данные объемной влажности, преимуществом может оказаться независимость измерений от плотности почвы.

К недостаткам этих приборов следует отнести сложность непосредственной тарировки датчиков по влажности, а также необходимость в некоторых случаях независимо измерять плотность почвы, чтобы исключить влияние структуры и технологической обработки. При стационарной установке датчиков подготовка данных по плотности и тарировка производятся однократно перед первичной установкой, конечно, при том условии, что химический состав и плотность почвы существенно не изменяются в пределах вегетационного периода.

Влияние химического состава, особенно существенное при использовании нейтронных влагомеров, может быть исключено только при прямой градуировке приборов на образцах почвы, взятых с поля. Изменения химического состава должны контролироваться по отдельным элементам (например, железо, хлор, бор и т. п.), способным активно взаимодействовать с потоком нейтронов.

Другие недостатки радиоактивной аппаратуры для определения влажности связаны с ее высокой стоимостью и радиоактивным излучением, которое требует выполнения правил техники безопасности при работе с источниками радиоактивного излучения. Этим обусловлена и необходимость в достаточно квалифицированном персонале.

До последнего времени не вполне ясен вопрос о влиянии небольших доз радиации от датчиков на развитие растений вблизи места стационарной установки зондов. Это особенно важно при пользовании нейтронным методом, так как в результате взаимодействия потока нейтронов с веществом почвы появляется заметная наведенная радиоактивность.

§ 12. Применение показателей влагосодержания почвы для управления поливом

В отличие от других показателей влагообеспеченности, параметры, связанные с наличием и доступностью почвенной влаги, позволяют прямо определять с достаточной оперативностью не только сроки, но и нормы полива, если обеспечена необходимая точность и репрезентативность измерений влагосодержания почвы. С этой точки зрения применение показателей данной группы наиболее удобно для управления поливом.

При организации полива по величине потенциала почвенной влаги (практически — сосущей силы почвы) истинные потребности растения во влаге определяются прямо при сопоставлении стабильного параметра — потенциала влаги для данного вида растений и фактического значения потенциала влаги на поле. Естественно, что в подобных ситуациях нет надобности в специальных биологических кривых, за исключением весьма редких случаев заметных изменений дефицита диффузионного давления для растения в пределах вегетационного периода при нормальном развитии растений.

Как уже отмечалось, оптимальный диапазон влажности почвы (70—100% полевой влагоемкости) мало меняется в пределах вегетационного периода и для основной группы культурных растений. Отклонения от этого наблюдаются, как правило, на завершающих периодах вегетации. В связи с этим, хотя для каждой фазы развития оптимальна определенная влажность, влияние отклонений от точного значения незначительно, если влажность почвы не выходит за пределы оптимального интервала 70—100% полевой влагоемкости. В идеальном случае регулирование влажности почвы должно производиться по биологическим кривым, отражающим ход изменений оптимальной влажности в процессе развития растений.

Расчеты режима полива на основе показателей влажности почвы в простейшем варианте обычно основываются на предположении, что расход почвенной влаги полностью обусловлен испарением. В более сложных случаях режим полива определяется с учетом всех составляющих водного баланса поля, и в соответствующем разделе он будет рассмотрен подробнее.

Возможен расчет режима полива, основанный на эмпирических данных об изменении средней влажности активного слоя во времени, при котором связь влагосодержания почвы с величиной испарения проявляется в неявном виде. Эта схема достаточно обоснована для аридной зоны, характеризующейся устойчивыми метеорологическими условиями и незначительными изменениями уровня грунтовых вод. Расчет позволяет оценить интервалы времени между поливами.

Уравнения регрессии, отражающие изменения средней влажности во времени, достаточно близки к линейным. Интегральный

Таблица 12

Сводная таблица методов определения доступной влаги в почве

Метод или показатель	Характеристика метода	Область применения	Эксплуатационные характеристики	
			достоинства	недостатки
Криоскопический метод определения потенциала влаги	Лабораторно-полевой	Исследования влаги в почве	Возможность определения полного потенциала влаги в почвенном образце	Малая точность измерений. Длительность измерений. Сложная аппаратура для охлаждения образцов
Психрометрический метод определения потенциала влаги	Лабораторно-полевой	Исследования влаги в почве	Возможность определения полного потенциала влаги в почвенном образце. Высокая точность измерений	Сложная аппаратура для термостатирования образцов при измерении. Длительность измерений
Определение капиллярного потенциала влаги в почве по перепаду давления (прессы, вакуум-капилляриметры, центрифуги)	Лабораторно-полевой	Исследования влаги в почве	Высокая точность измерений. Простота аппаратуры. Возможность получения зависимости между влажностью почвы и капиллярным потенциалом	Ограниченный диапазон измерений для отдельного прибора. Сложность применения метода для оценки фактического потенциала влаги в поле
Определение капиллярного потенциала влаги в почве с помощью тензиометра	Лабораторно-полевые	Исследования влагообеспеченности. Управление поливом	Определение капиллярного потенциала влаги в почве в полевых условиях. Возможность дистанционных измерений	Ограниченный диапазон измерений. Необходимость периодической промывки и наладки прибора

Определение влагосодержания почвы для пробы (методом термостатной или вакуумной сушки и взвешивания)	Лабораторно-полевой	Исследования влагообеспеченности почвы. Управление поливом	Простота обработки пробы. Высокая точность определения влажности почвы	Большая изменчивость показателя в пределах поля. Большая длительность измерений. Невозможность повторных измерений в одной и той же точке
Определение влагосодержания по электропроводности или диэлектрической проницаемости почвы	Полевой	Исследования влаги и соли в почве. Управление поливом	Дистанционный отсчет. Электрический сигнал на выходе измерителя. Длительные измерения в одной точке поля. Значительное осреднение по объему почвы. Широкий диапазон влагосодержания	Зависимость показаний от контакта зонда с почвой. Значительная зависимость показателя от температуры, плотности почвы, концентрации соли и т. д. Большая изменчивость показателя в пределах поля. Сложность измерений (для диэлектрической проницаемости)
Определение потенциала влаги по электросопротивлению гипсовых блоков	Полевой	Оценка влагообеспеченности почвы и управление поливом	Дистанционный отсчет при электрическом сигнале на выходе измерителя. Слабая зависимость от концентрации соли в почве. Простота и быстрота измерений. Длительные измерения в одной точке	Ограниченный диапазон влагосодержания. Большая инерция и гистерезис датчиков. Ограниченный срок службы датчиков из-за изменений тарировки со временем. Большая изменчивость показателя в пределах поля. Зависимость точности измерений от температуры почвы

Метод или показатель	Характеристика метода	Область применения	Эксплуатационные характеристики	
			достоинства	недостатки
Определение влагосодержания почвы по ее теплофизическим характеристикам	Полевой	Исследования влаги в почве. Управление поливом	Широкий диапазон влагосодержания. Дистанционный отсчет при электрическом сигнале на выходе. Независимость от концентрации соли и температуры. Длительные измерения в одной точке поля	Зависимость показаний от контакта зонда с почвой. Длительность одного измерения. Большая изменчивость показателя в пределах поля
Определение потенциала влаги по электрическим параметрам пористого керамического блока (сопротивление или диэлектрическая проницаемость)	Полевой	Исследования влаги и соли в почве. Управление поливом	Дистанционный отсчет при электрическом сигнале на выходе. Длительные измерения в одной точке поля	Ограничение диапазона измерений типом пористого блока. Большая инерция и гистерезис. Зависимость точности измерений от температуры и концентрации соли
Определение потенциала влаги по теплофизическим параметрам пористого керамического блока	Полевой	Исследования влаги в почве. Управление поливом	Дистанционный отсчет при электрическом сигнале на выходе. Независимость от концентрации соли и температуры почвы. Длительные измерения в одной точке поля	Ограничение диапазона измерений типом пористого блока. Большая инерция и гистерезис. Большая изменчивость показателя в пределах поля
Определение влагосодержания почвы по поглощению гамма-излучения	Полевой	Исследования влаги в почве. Управление поливом	Осреднение по значительному объему почвы. Дистанционный отсчет при электри-	Зависимость точности измерений от плотности почвы и ее состава. Высокая стоимость

			ческом сигнале на выходе. Слабая зависимость от концентрации соли в почве. Возможность длительных измерений в одной точке поля. Широкий диапазон измерений влагосодержания	оборудования. Необходимость специальных мер техники безопасности
Определение влагосодержания почвы по рассеянию гамма-излучения	Полевой	Исследования влаги в почве. Управление поливом	Дистанционный отсчет при электрическом сигнале на выходе. Осреднение по значительному объему почвы. Слабая зависимость от концентрации соли в почве. Возможность длительных измерений в одной точке поля. Широкий диапазон влагосодержания	Малая разрешающая способность по глубине. Необходимость поверхностных зондов. Зависимость точности от плотности почвы и ее состава. Высокая стоимость оборудования. Необходимость специальных мер техники безопасности
Определение влагосодержания по рассеянию нейтронов	Полевой	Исследования влаги в почве. Управление поливом	Независимость от плотности почвы и концентрации соли. Дистанционный отсчет при электрическом сигнале на выходе. Осреднение по значительному объему почвы. Возможность длительных измерений в одной точке поля. Широкий диапазон влагосодержания	Малая разрешающая способность по глубине. Необходимость специальных поверхностных зондов. Зависимость точности от состава почвы. Высокая стоимость оборудования. Необходимость специальных мер техники безопасности

учет связей с метеорологическими параметрами и биометрическими характеристиками растительного покрова приводит к степенным связям типа

$$W = At^{\alpha},$$

где t — время, A — коэффициент, зависящий от начальной влажности почвы, α — показатель степени, связанный с испаряемостью и листовым индексом (объемом зеленой массы).

Несмотря на сложность оценки среднего влагосодержания активного слоя, показатели количества почвенной влаги достаточно широко применяются в разнообразных научных исследованиях, а также при решении практических задач, когда речь идет об управлении поливом.

Основываясь на экспериментальных данных, обычно выбирают уровень установки датчиков, для которого среднее значение влажности за рассматриваемый период времени максимально приближается к среднему показателю для всего активного слоя почвы. Как правило, этот уровень совпадает с зоной максимальной плотности распространения корневой системы. Степень приближения зависит от характера корневой системы и стабильности условий водного питания. Так, например, при больших колебаниях в течение вегетационного периода горизонта преобладающего водоснабжения обычно не удается ограничиться измерением только на одном уровне. Это же относится и к культурам с достаточно большой глубиной корнеобитаемого слоя (более 1,5—2,0 м).

В случаях когда измерения с помощью единичного датчика достаточно репрезентативны, они могут использоваться для установления сроков полива и расчета поливной нормы с учетом необходимости доведения влагосодержания до полевой влагоемкости.

В реальных автоматизированных оросительных системах применяются различные варианты использования датчиков влагосодержания почвы для управления поливом. В одном из вариантов реализованных систем используются два датчика влажности почвы типа Бойукоса [33]. Один из них устанавливается в зоне максимального распространения корневой системы растений и обеспечивает подачу сигналов о необходимости включения полива при достижении минимальной допустимой влажности почвы. Второй датчик устанавливается вблизи нижней границы корнеобитаемого слоя и обеспечивает подачу сигнала прекращения полива при просачивании воды на уровень установки датчика. Другой осуществленный вариант системы автоматизированного полива использует в качестве датчика наличия доступной растению влаги тензиометр [34]. В этом случае сигналы начала и конца полива подаются с электроконтактной системы измерительного манометра, входящего в комплект тензиометра. Оба эти принципа осуществлены в полевых оросительных системах открытого и закрытого грунта.

Относительно реже используется в практических условиях управление влагообеспеченностью растений на поле за счет поддержания заданного уровня грунтовых вод. Этот принцип можно использовать в комбинированных системах двухстороннего регулирования (осушение—орошение). В качестве управляющего элемента в подобных системах применяются различные электрические датчики уровня грунтовых вод.

При некоторых исследованиях оптимальной влагообеспеченности управление водным режимом в больших вегетационных сосудах или испарителях осуществляется за счет регулирования уровня грунтовых вод.

Характеристики и некоторые особенности применения методов определения основных показателей наличия в почве доступной растениям влаги приводятся в табл. 12. Так же как и в сводной таблице физиологических методов, в данном случае применено условное разделение их на лабораторные, лабораторно-полевые и полевые методы. Отдельные модификации приборов в таблице не рассматриваются, а оценка методов производится с позиций пригодности их для определения влагообеспеченности сельскохозяйственных полей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Берлинер М. А. Электрические методы и приборы для измерения и регулирования влажности. Энергоиздат, М., 1960.
2. Будаговский А. И. Испарение почвенной влаги. Изд. «Наука», М., 1964.
3. Влажность, т. I. Принципы и методы измерения влажности в газах. Гидрометеоиздат, Л., 1967.
4. Влажность, т. IV. Принципы и методы измерения влажности в жидкостях и твердых телах. Гидрометеоиздат, Л., 1968.
5. Вознесенский А. С., Дуниамалян С. Х. Применение тензиометров для оперативной корректировки плановых поливов. Тр. ГрузНИИГиМ, вып. 2, 1951.
6. Вопросы агрономической физики. Под ред. А. Ф. Иоффе и И. И. Самойлова. Сельхозгиз, Л., 1957.
7. Глобус А. М. Экспериментальная гидрофизика почв. Гидрометеоиздат, Л., 1969.
8. Глобус А. М., Каганов М. А. Почвенный термовлагомер с полупроводниковым датчиком. Тр. АФИ, вып. 13, 1966.
9. Данилин А. И. Омический метод измерения влажности почвы с применением угольных электродов в стекловолокне. Тр. НИИГМП, вып. 5., 1957.
10. Долгов С. И. Исследование подвижности почвенной влаги и ее доступности для растений. Изд. АН СССР, М.—Л., 1948.
11. Емельянов В. А. Гамма-лучи и нейтроны в полевых почвенно-мелиоративных исследованиях. Госатомиздат, М., 1962.
12. Измерительная техника в сельском хозяйстве. Сб. статей. ОНТИприбор, М., 1967.
13. Кондратьев Г. М. Регулярный тепловой режим. Гостехиздат, Л., 1954.
14. Лискер И. С., Орехова И. Г. Установка для исследования зависимости электрофизических характеристик дисперсных материалов от влажности. Тр. АФИ, вып. 16. 1968.

15. Мичурин Б. Н. Взаимная зависимость между содержанием влаги, всасывающим давлением и удельной поверхностью почвы. Почвоведение, № 8, 1967.
16. Наставление гидрометеорологическим станциям и постам, вып. 11. Гидрометеоиздат, Л., 1955.
17. Нерпин С. В., Чудновский А. Ф. Физика почвы. Изд. «Наука», М., 1967.
18. Оделевский В. И. Закон обобщенной проводимости. ЖТФ, т. 21, стр. 667, 1951.
19. Основы агрономической физики. Под ред. А. Ф. Иоффе и И. Б. Ревута. Физматгиз, М., 1959.
20. Попов Л. В. Методы определения влажности почв. Изд. АН СССР, М., 1960.
21. Ревут И. Б. Физика почв. Изд. «Колос», Л., 1964.
22. Роде А. А. Основы учения о почвенной влаге, т. I. Гидрометеоиздат, Л., 1965.
23. Роде А. А. Основы учения о почвенной влаге, т. II. Гидрометеоиздат, Л., 1969.
24. Руководство по определению агрометеорологических свойств почвы на гидрометстанциях. Гидрометеоиздат, Л., 1964.
25. Слейтер Р., Макилрой И. Практическая микрометеорология. Пер. с англ. Под ред. С. А. Вериго и С. А. Сапожниковой. Гидрометеоиздат, Л., 1964.
26. Степанов Л. Н. Диэлектрическая проницаемость почвы. Тр. АФИ, вып. 22, 1970.
27. Степанов Л. Н. Измерение влажности и солености почвы кондуктометрическим методом. Сб. «Исследования процессов обмена энергией и веществом в системе почва — растение — приземный воздух». Изд. «Наука», М., 1971.
28. Термодинамика почвенной влаги. Сб. статей. Пер. с англ. под ред. А. М. Глобуса. Гидрометеоиздат, Л., 1966.
29. Физика среды обитания растений. Сб. статей. Пер. с англ. под ред. А. М. Глобуса и М. А. Каганова. Гидрометеоиздат, Л., 1968.
30. Холмс И. В. Вопросы измерения влажности почвы в аридных условиях. Сб. статей «Климатология и микроклиматология». Пер. с англ. под ред. В. С. Самойленко. Изд. «Прогресс», М., 1964.
31. Черняк Г. Я. Методы определения естественной влажности песчаных грунтов. Госэнергоиздат, М., 1955.
32. Чудновский А. Ф. Теплофизические характеристики дисперсных материалов. Физматгиз, М., 1962.
33. Automatic surface irrigation sistem. Q. Servg. Rauch Houm, v. 13, No 2. 1966.
34. Here is a sistem that gives moisture an Demand automatically. Farm. Power Equipin., v. 43, No 4, 1967.
35. Richards L. A. Porous plate apparatus for measuring moisture retention and transmission by soil. Soil. Sci. Soc. Amer. Proc., v. 18, No 1, 1948.
36. Richards L. A. Metods of measuring soil moisture tension. Soil. Sci., v. 68, p. 95—112, 1949.

Глава III

РАСЧЕТНЫЕ МЕТОДЫ ОЦЕНКИ ВЛАГООБЕСПЕЧЕННОСТИ

Методы оценки влагообеспеченности, рассмотренные в двух предыдущих главах, могут быть отнесены к прямым. Сигнализация дефицита влаги производится по достижении некоторого критического значения выбранного параметра, связанного с влагосодержанием почвы или физиологическими показателями влагообеспеченности растений. Косвенная оценка часто легче осуществляется, чем прямая, а сами косвенные показатели обусловлены физиологическими или почвенными факторами — функциональными зависимостями разной степени сложности. При этом в конечном счете определяющим параметром влагообеспеченности является все-таки доступная влага активного слоя почвы. Работы последних лет показали, что практически все косвенные методы оценки влагообеспеченности могут быть сведены к определению наличия доступной влаги.

Среди расчетных методов рассмотрим:

1) методы, связанные с определением агрометеорологических параметров приземного воздуха, обусловленных биологическими факторами (транспирацией и т. п.). Анализ позволяет выявить их связь с наличием почвенной влаги;

2) методы, связанные с определением агрометеорологических показателей почвы. Они непосредственно зависят от количества почвенной влаги. Данная группа включает методы определения влагосодержания почвы по общим метеорологическим показателям;

3) метод водного баланса поля. С его помощью можно определить агрометеорологические показатели как для приземного воздуха, так и для почвы.

Для всех этих методов характерно то, что в процессе измерений определяется комплекс вторичных параметров, по которым затем рассчитываются показатели влагообеспеченности. Различным методам соответствует разная степень сложности измерений и точности определения конечного критерия. Но для большинства из них свойственно также наличие приближенной модели, описывающей связь измеряемого параметра с конечным.

Особенности методов обусловливают специфику их практического применения. Как правило, для определения критериев влагообеспеченности по этим группам методов необходима довольно сложная и трудоемкая обработка материалов наблюдений. Это требует применения систем сбора информации и вычислительной техники разной степени сложности и значительно затрудняет получение оперативной информации [41, 44]. Но, с другой стороны, для расчета показателей влагообеспеченности в ряде случаев могут применяться данные метеосети, что существенно упрощает техническое обеспечение наблюдений.

Рассматриваемые в данной главе агрометеорологические методы перспективны с точки зрения механизации и автоматизации наблюдений, чем они принципиально отличаются от большинства физиологических и почвенных методов определения потребности растений во влаге. Несмотря на это, подобные методы недостаточно распространены при исследованиях влагообеспеченности, очевидно, из-за специфичности сложных метеонаблюдений. Вследствие новизны и недостаточного распространения подобных методов экспериментальные данные по эффективности применения тех или иных агрометеорологических критериев влагообеспеченности часто оказываются недостаточно полными и надежными. Эта работа только начинается. Ее развитие и успешное применение в большой мере будет зависеть от освоения теоретических и экспериментальных основ измерительных методов.

§ 1. Агрометеорологические показатели приземного слоя воздуха

Как известно, микроклиматические характеристики приземного слоя воздуха формируются под действием подстилающего растительного покрова и в свою очередь воздействуют на него. При исследованиях система почва — растение — воздух должна рассматриваться в равновесном состоянии, если надо получить ее осредненные характеристики. Состояние системы, интересующей нас, обусловливается притоком энергии к деятельной поверхности и процессами обмена в приземном слое, препятствующими достижению насыщения воздуха водяным паром непосредственно в области деятельной поверхности. В свою очередь процессы обмена зависят от перепада концентрации рассматриваемых субстанций в приземном слое воздуха. Поскольку все процессы обмена взаимосвязаны, почти любой из метеорологических параметров может быть использован для индикации влагообеспеченности. Для этого необходимо только накопить достаточно полный материал по функциональным связям или корреляционным соотношениям параметров влагообеспеченности и метеорологических элементов.

Рассмотрим баланс водяного пара в столбе воздуха с площадью сечения 1 см^2 (рис. 42). Поступление влаги в рассматриваемый объем ограничивается притоком пара N_z^0 от почвы (деятельной

поверхности) и притоком пара N^0_x, переносимого ветром. Расход влаги из столба составляется из общего расхода влаги через верхнюю границу и выносом пара ветром N'_x. Возможны случаи, когда влага частично расходуется на изменение влагосодержания в исследуемом объеме Δw_z.

Остановимся несколько более подробно на элементах баланса пара. Приток воды из почвы N^0_z составляется из испарения E (или транспирации) и непосредственной диффузии пара из почвенных пор $E_п$. Этот последний фактор обычно мал, но в некоторых особых условиях (например, в случае оголенной почвы с подсушенной коркой на поверхности) становится доминирующим.

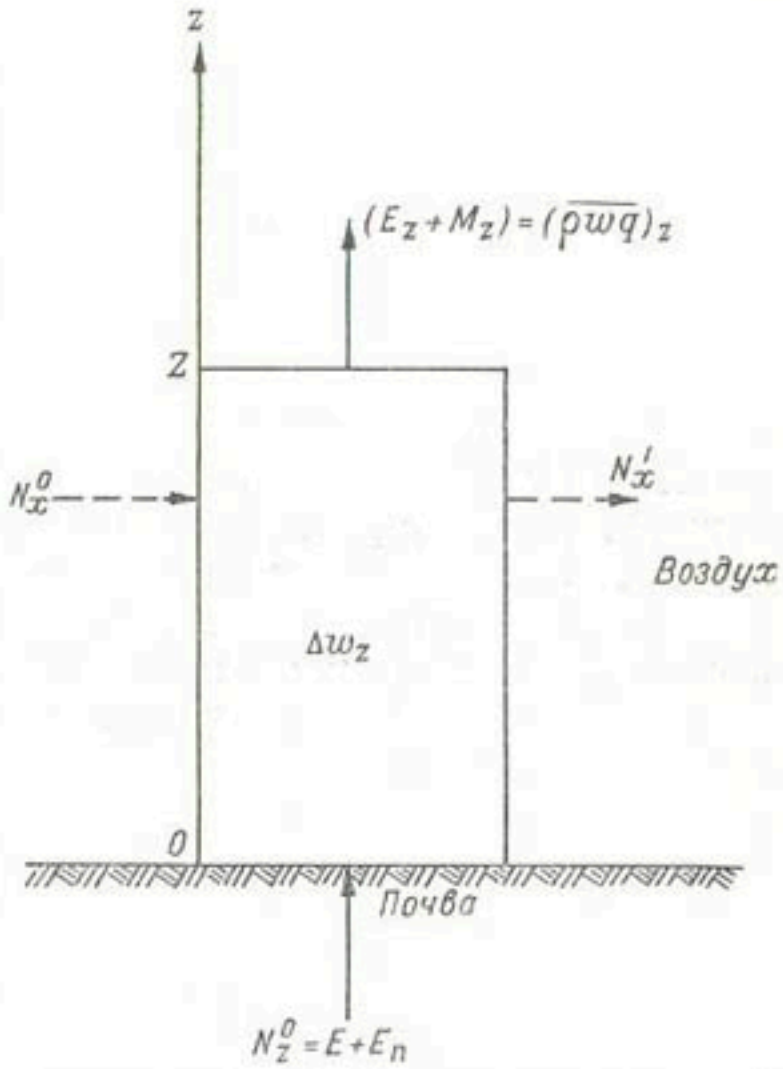


Рис. 42. Схема баланса влаги столба воздуха в приземной атмосфере.

Для простоты в данном случае рассмотрим двухмерную схему, принципиально не отличающуюся от трехмерной. Горизонтальное перемещение пара с ветром может быть оценено по соотношению

$$N_x = \int_0^z \overline{(\rho u q)}\, dz, \qquad \text{(III.1)}$$

где ρ и q — мгновенные значения плотности и удельной влажности воздуха в данной точке, u — составляющая скорости по оси X. Черта над скобкой здесь и далее означает осреднение за некоторый период. Разность

$$A^{(z)}_x = N^0_x - N'_x = \int_0^z \overline{\left[(\rho u q)^0 - (\rho u q)'\right]}\, dz =$$

$$= \int_0^z \overline{\frac{\partial}{\partial x}(\rho u q)}\, dz \qquad \text{(III.2)}$$

представляет собой горизонтальную адвекцию влаги в слое Z в направлении x. Приближенно

$$A^{(z)}_x = Z\,\overline{(\rho u)_z}\,\overline{\left(\frac{\partial q}{\partial z}\right)_z}.$$

Рассмотрим остальные составляющие баланса пара. Расход пара через верхнюю границу столба $\overline{(\rho w q)}_z = E_z + M_z$ может быть разделен на две составляющие: E_z, связанную с переносом пара турбулентным потоком, и M_z — вертикальную адвекцию влаги. Поскольку на достаточно больших однородных площадках устойчивые вертикальные течения не наблюдаются, составляющая M_z практически отсутствует. Она может быть заметной при точечных измерениях и отражает в этом случае наличие неоднородностей деятельной поверхности. Приближенно $M_z \approx Z(\rho w)_z \left(\frac{\partial q}{\partial z}\right)_z$. Здесь и далее w — мгновенное значение вертикальной составляющей скорости ветра (по оси Z).

Изменение влагосодержания в объеме $\Delta w_z = \int_0^z \frac{\partial(\rho q)}{\partial \tau} dz$ будет существенным, если в пределах рассматриваемого столба происходит изменение агрегатного состояния влаги (образование тумана, дождя). Такие случаи возможны, когда длина столба достаточно велика. В практически важных случаях в приземном слое воздуха в общем балансе влаги доля изменений влагосодержания Δw_z весьма мала и лежит в пределах погрешностей измерений.

Учитывая реально существующие элементы баланса, можно представить приближенный баланс влаги для приземного слоя воздуха в виде соотношения

$$E = E_z + A_x + M_z, \qquad \text{(III.3)}$$

из которого видно, что в случаях, когда адвективные потоки горизонтального A_x и вертикального M_z переноса можно считать пренебрежимо малыми, величина суммарного испарения E может быть определена по потоку водяного пара E_z на уровне Z.

Этот вывод имеет принципиальное значение для анализа возможностей определения испарения. В силу специфической формы деятельной поверхности растительного покрова измерения на границе раздела практически невозможны и удаление уровня измерений от границы растительного покрова — необходимая предпосылка реализации точных измерений.

Остановимся несколько подробнее на принципиальных основах измерения испарения E или потока пара E_z. Простейший метод анализа испарения — расчетная схема теплового баланса, основанная на приложении закона сохранения энергии к деятельной поверхности растительного покрова. Можно считать, что приток энергии к деятельной поверхности ограничен значением радиационного баланса R, равного разности падающего излучения солнца (прямого и рассеянного) и противоизлучения поверхности. Противоизлучение в свою очередь составляется из отраженной доли приходящей радиации и длинноволнового излучения деятельной поверхно-

сти (интенсивность которого определяется нагревом поверхности). В некоторых случаях приток энергии к площадке превышает радиационный баланс, но эти исключительные ситуации должны быть рассмотрены отдельно.

Расходные части баланса составляются из потока тепла в почву B, потока тепла от деятельной поверхности в воздух P, затрат тепла на испарение влаги LE. При наличии растительного покрова часть энергии F затрачивается на фотосинтез. По сравнению с любой другой составляющей баланса эта доля мала и для обычных расчетов ею можно пренебречь, так как величина F одного порядка с ошибками.

Из элементов теплового баланса с водным обменом непосредственно связана величина испарения. Обычно различают две составляющие испарения: физическое испарение с поверхности почвы и транспирацию. Транспирация и механизмы ее изменения рассмотрены в главе I.

Как уже отмечалось, почва представляет собой пористую систему. Если вообще задача об испарении с поверхности капиллярно пористых тел с фиксированным размером капилляров поддается более или менее строгой математической формулировке и решению, то для почвы естественного сложения решение таких задач встречает огромные трудности. Особенно сложна задача массообмена для достаточно частого случая перемещения фронта испарения в глубину, когда на поверхности образуется корка. Механизмы перемещения влаги и водяного пара в системе капилляров и у поверхности почвы в этом случае чрезвычайно сложны для анализа. В большинстве случаев выводы приходится основывать на эмпирических данных по испарению с различных почв в разнообразных условиях.

Особенности изменения испарения в годовом ходе связаны с тем, что до появления всходов растительности на поле физическое испарение является единственно возможным. По мере развития растительности дополнительно к физическому испарению появляется составляющая, связанная с транспирацией. Естественно, что доля физического испарения в суммарном падает как в абсолютных, так и в относительных значениях. Абсолютное уменьшение связано с экранировкой поверхности почвы появившимися растениями. Относительное уменьшение доли физического испарения обусловлено тем, что суммарная поверхность листьев заметно больше поверхности почвы (по крайней мере в случае сомкнутого травостоя), а условия обмена паром у листьев лучше и интенсивность испарения больше. Транспирационный поток водяного пара монотонно растет до момента смыкания травостоя, после которого начинает сказываться экранировка листьев нижних ярусов. К этому моменту поток пара из почвы практически не выходит за пределы растительного покрова и измеряемое над растениями суммарное испарение практически полностью обусловлено транспирационным потоком влаги.

Анализ показывает, что почвенная составляющая испарения заметна до величины листового индекса 1,5—2, что соответствует смыканию травостоя. Листовой индекс равен отношению фактической площади листьев к площади посева. Это иллюстрируют кривые на рис. 43, построенные по данным расчета, в котором учитывается прохождение радиации через лиственный покров и естественное изменение распределения энергии по мере увеличения растительной массы (листовой индекс ω_0). Поэтому в гипотетических условиях отсутствия испарения с почвы значение транспирационного потока растет, так как на него затрачивается большая энергия. Кривые на рис. 43 соответствуют возможным реальным значениям испарения с почвы. Значения транспирации и испарения нормированы по максимально возможному испарению. Следовательно, на определенных этапах вегетационного периода имеются основа-

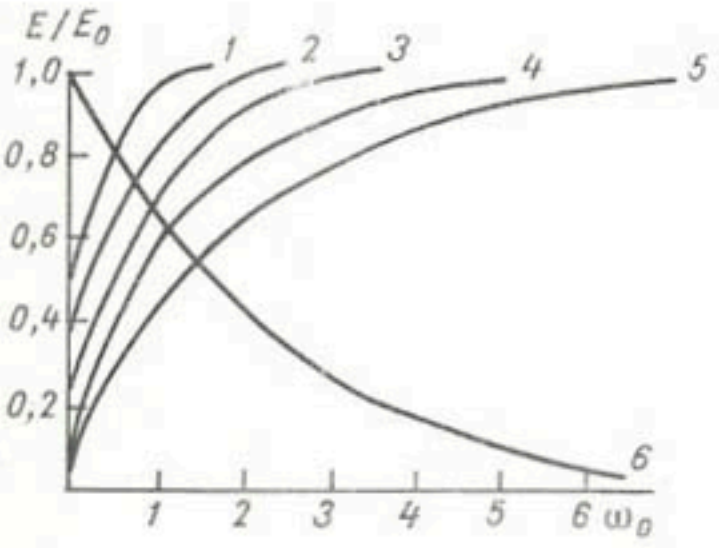


Рис. 43. Зависимость испарения от степени развития растительного покрова (расчетные данные А. И. Будаговского).

E/E_0 — отношение испарения к испаряемости, ω_0 — листовой индекс. *1* — суммарное испарение при испарении с почвы $E_п$ = =0,3 мм/час, *2* — суммарное испарение при $E_п$=0,2 мм/час, *3* — суммарное испарение при $E_п$=0,1 мм/час, *4* — транспирация растительного покрова при $E_п$=0, *5* — транспирация растительного покрова при максимальном испарении с почвы, *6* — максимально возможное испарение (испаряемость) с почвы под пологом растений ($E_{оп}$).

ния для замены сложных и недостаточно точных измерений транспирации на относительно более удобные и точные измерения суммарного испарения. При этом, так же как и для транспирации, на величину суммарного испарения влияет не только водный режим, но и интенсивность радиации и условия минерального питания.

Аналогичная картина складывается при рассмотрении потока тепла от деятельной поверхности в воздух. Поглощая энергию приходящего излучения, деятельная поверхность нагревается выше температуры среды и часть полученного тепла отдает непосредственно среде. Интенсивность этого обмена пропорциональна степени перегрева по отношению к среде. Так как в процессе испарения расходуется тепло, ясно, что, чем больше испарение с деятельной поверхности, тем ниже ее температура и тем меньшая доля приходящей радиации расходуется на прямую теплоотдачу. Если рассматривать годовой ход теплового потока в воздух, то общий характер изменений будет обратным ходу испарения. Для открытой почвы значение P велико, а по мере накопления зеленой массы растений доля теплового потока в воздух в общем балансе энергии падает.

Остановимся несколько подробнее на часто встречающемся отклонении от нормальной схемы модели теплового баланса. При этой аномалии наблюдаются дневные инверсии температуры и общий приток энергии к деятельной поверхности складывается из радиационного баланса и турбулентного потока тепла из приземного слоя воздуха.

Как уже отмечалось, в условиях малой влажности и высокой температуры воздуха (большой дефицит насыщения) при достаточном увлажнении данного поля транспирация лиственного покрова вызывает существенное понижение температуры деятельной поверхности. Такое понижение может быть настолько значительным, что температура поверхности становится ниже температуры воздуха. В приземном слое образуется зона устойчивой инверсии температуры и изменяется знак турбулентного потока тепла. Процессы обмена при этом поддерживаются за счет турбулентности горизонтального ветрового потока. Эксперименты на хлопковом поле показали, что при удалении листьев с растений посредством химической дефолиации глубокая инверсия сменяется нормальным распределением температуры. Как правило, такие процессы происходят в оазисах и их связывают с влиянием масс сухого и горячего воздуха из пустыни, располагающихся на относительно небольшой высоте (десятки метров) над оазисом. Подобные явления обычно называют оазисным эффектом. Следует отметить, что оазисный эффект иногда встречается и в зоне достаточного увлажнения, где он проявляется обычно, как и в аридной зоне, в превышении испарения над радиационным балансом. Такого рода явления наблюдаются на ограниченных площадках. Для бассейна или зоны в целом оазисный эффект не проявляется и имеет место нормальное замыкание теплового баланса.

Наличие оазисного эффекта не обязательно обусловливается процессами на границе участка. Пограничные искажения температурного поля могут быть связаны с мелкомасштабной адвекцией, а оазисный эффект больших массивов — с относительно крупномасштабной. В последнем случае непосредственно над полем могут формироваться нормальные стационарные однородные условия, для которых процессами адвекции можно пренебречь, что часто существенно при реализации различных методов оценки испарения.

Тепловой поток в почву B определяется теплофизическими характеристиками почвы и степенью нагрева ее поверхности. Теплофизические характеристики верхнего слоя почвы функционально связаны с ее составом и структурой, зависят от агротехнической обработки и развития корневой системы растительного покрова. Наиболее заметна связь этих характеристик с влажностью почвы, так как при изменении влажности одновременно увеличиваются и теплопроводность, и теплоемкость теплопроводящей среды.

Годовой ход изменений теплового потока в почву обусловлен изменениями радиационного баланса, а в период развития растительности — затенением поверхности почвы лиственным покровом.

Это затенение сказывается на величине B существенно больше, чем изменение теплофизических характеристик почвы за счет роста корневой системы или изменений влажности.

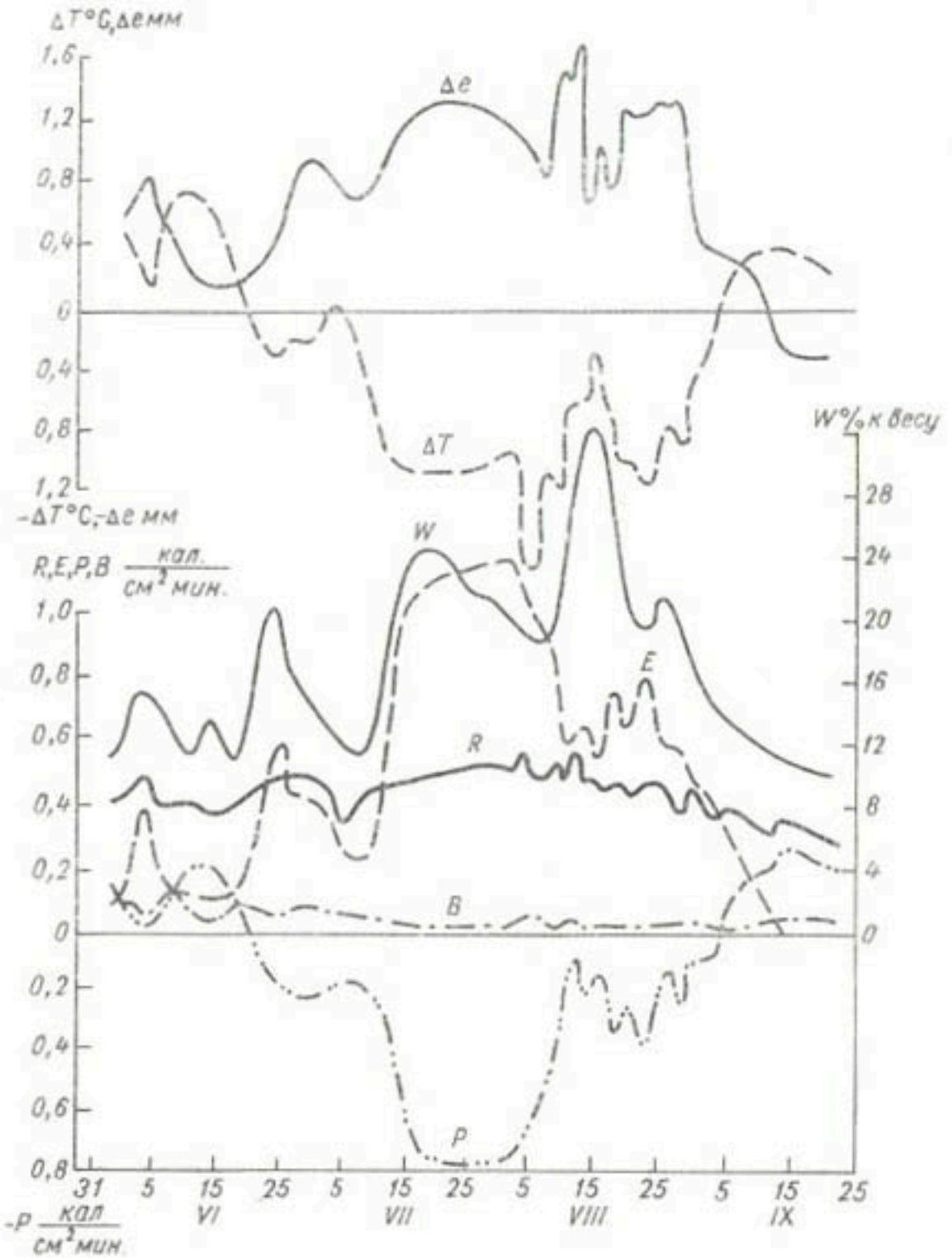


Рис. 44. Сезонный ход радиационного баланса R, турбулентного потока тепла P, суммарного испарения E, потока тепла в почву B, влажности почвы W, градиентов температуры и влажности воздуха ΔT и Δe для хлопчатника (Ашхабад).

Полив производился 4 и 21 июня, 13 июля, 13 августа.

Исследования и измерения элементов теплового баланса обобщены в работе М. И. Будыко [4]. С точки зрения исследований влагообеспеченности подобные данные представляют интерес для орошаемых полей. Пример влияния орошения на изменение величин теплового баланса [5] сельскохозяйственного поля показан на рис. 44.

Потоки тепла и водяного пара, входящие в уравнение теплового баланса сельскохозяйственного поля, могут быть определены различными способами [6, 11, 13, 20, 33, 48]. Стационарный однородный поток любой пассивной субстанции может быть описан уравнением

$$N = aK(S_1 - S_2); \qquad \text{(III.4)}$$

здесь K — коэффициент, характеризующий интенсивность переноса субстанции между двумя уровнями, на которых ее концентрация соответственно S_1 и S_2; a — коэффициент размерности, характерный для данной субстанции.

Применительно к рассматриваемому случаю под пассивной субстанцией понимается теплота, или пары воды, или углекислый газ. Если известны коэффициенты обмена для перечисленных субстанций, то, измерив градиенты температуры, абсолютной влажности или концентрации CO_2, мы получим интересующие нас потоки.

Размещая точки измерений перепадов вблизи растительного покрова, можно получить суммарное испарение, поток тепла в воздух или поток углекислоты, пропорциональный интенсивности фотосинтеза. Поскольку нас интересует поток на границе двух сред (растительный покров—воздух), было бы правильно одну из точек измерения концентрации размещать непосредственно на границе. Но для растительного покрова можно установить поверхность раздела только условно, фактически граница сугубо неоднородна. С другой стороны, вообще трудно определять пограничные значения какого-либо параметра, так как наличие датчика, как правило, искажает естественные условия на границе сред. В тех случаях, когда это необходимо, условия на границе двух слоев или зон и уровень расположения границы определяются экстраполяцией профилей распределения параметров внутри слоев в область предполагаемой границы. Таким образом определяется применительно к растительному покрову уровень деятельной поверхности, который считают обычно верхней границей травостоя. Именно на уровне деятельной поверхности проходит основная граница соприкосновения воздушного потока приземного слоя с травостоем. Высота деятельной поверхности над уровнем почвы близка к $^2/_3$ высоты растительного покрова, причем отношение этих высот в общем случае зависит как от густоты травостоя, так и от скорости ветра. Эта зависимость не очень существенна и поправки при ее учете не превышают 10—15% к обычно применяемому значению высоты деятельной поверхности на уровне $^2/_3$ высоты травостоя.

В некоторых случаях при анализе процессов обмена растительный покров до высоты уровня деятельной поверхности условно разделяется на два слоя. Один из них, нижний,— слой вытеснения. Высота его характеризует величину, на которую сдвигается профиль ветра в приземной атмосфере при перемещении от площадки с оголенной почвой на площадку, покрытую растительностью. Слой вытеснения соответствует области травостоя, для которой обмен с внешней атмосферой затруднен.

Второй слой — слой шероховатости, по существу представляет собой переходную область от турбулентной атмосферы к пограничному слою, примыкающему к поверхности почвы или условной границе слоя вытеснения. Высота слоя шероховатости Z_0 зависит от размеров неоднородностей площадки. В соответствии с данными аэродинамических исследований для малых размеров выступов площадки высота слоя шероховатости около $^1/_{30}$ высоты выступа. Такого порядка величины наблюдаются для поверхности воды, снега, выровненной почвы. Для плохо обтекаемых поверхностей, что типично для растительного покрова, высота слоя Z_0 шероховатости составляет приблизительно $^1/_7$ геометрической высоты шероховатости. Поэтому для нижнего уровня установки датчиков принято выбирать высоту большую, чем удвоенная высота деятельной поверхности.

Формула (III.4) при неизменности свойств среды справедлива для однородного стационарного потока. В рассматриваемом случае это связано в первую очередь с исключением горизонтальной адвекции. Хотя общие принципы теплового баланса применимы в условиях адвекции, значения потоков тепла в этих условиях являются функцией высоты, что значительно усложняет измерения. При реализации измерений на достаточно больших площадках на них формируется характерный для данного вида растительности микроклимат приземного слоя воздуха. Пограничные эффекты за счет влияния смежных полей, имеющих другие микроклиматические характеристики, исключаются, они не влияют на значения измеряемых параметров.

Значительно сложнее решается вопрос о реализации условия стационарности потоков. Оно включает отсутствие изменений средней концентрации во времени (эквивалентно условию $\Delta w_z = 0$) и исключение влияния пульсаций. Вследствие турбулентного характера движения воздуха в приземной атмосфере и наличия пульсаций метеоэлементов эта проблема связана с определением оптимальных интервалов осреднения измеряемых параметров.

Обычно расчеты теплового баланса проводятся для средних значений метеоэлементов за достаточно большие промежутки времени. До сих пор остается дискуссионным вопрос о правомерности расчетов подобного типа для относительно небольших интервалов. Это связано с тем, что механизмы тепло- и массообмена в приземном слое инерционны, причем «постоянные времени» различных элементов процесса различаются. Поэтому в суточном ходе градиенты концентрации пара сдвинуты по фазе по отношению к градиентам температуры и к коэффициентам обмена. Чем меньше интервал осреднения параметров, тем бóльшую погрешность вносит естественный сдвиг фаз в истинные значения потоков. При больших интервалах осреднения ошибки компенсируются, так как в процессе суточного хода знак отклонений меняется и в среднем за несколько суток ошибка может практически полностью компенсироваться.

Высказанные замечания касаются только ограничений применения формул типа (III.4), и их необходимо иметь в виду при подборе методов и анализе результатов.

Основная задача при использовании формул типа (III.4) —определение коэффициента обмена (в (III.4) коэффициент переноса). Для неподвижной среды это физическая константа типа коэффициента диффузии (или теплопроводности). Применительно к условиям, существующим в атмосфере, применяется понятие коэффициента турбулентной диффузии по формальной аналогии с процессами переноса. Причем этот параметр практически не связан с указанными физическими константами. Он соответствует макропроцессу и определяется в основном структурой турбулентности в среде. С этой точки зрения коэффициент турбулентной диффузии — универсальный параметр, величина которого не должна зависеть от физических характеристик переносимых субстанций. Такая универсальность может быть обоснована при рассмотрении процессов, происходящих в турбулентном потоке.

Характерной особенностью турбулентного потока является то, что скорость движущейся субстанции в нем меняется как по величине, так и по направлению более или менее случайно. Это связывают с наличием областей, в которых осуществляется циркуляция частиц (или микрообъемов); такую область называют вихрем. Поскольку каждый вихрь соприкасается с несколькими соседними, в него периодически попадают частицы (или микрообъемы) с характеристиками, соответствующими смежным областям. В пределах одного вихря процессы физической диффузии практически не играют роли, так как динамические процессы смешения обеспечивают значительно более интенсивное перемешивание. Поэтому можно считать, что в пределах объема вихря все характеристики среды постоянны (пульсации изменений их пренебрежимо малы). На границах между вихрями также доминируют процессы увлечения массы и роль физической диффузии минимальна. Сам по себе вихрь существует относительно короткий промежуток времени, по истечении которого он распадается, и масса, составляющая его, переходит в соседние, более «молодые» вихри.

Молекулярная диффузия, коэффициенты которой для разных субстанций заметно различаются, в процессах турбулентного перемешивания и обмена практически не играет роли, а с точки зрения механического перемешивания свойства рассматриваемых субстанций практически одинаковы — на этом и базируется априорное предположение о равенстве коэффициентов турбулентной диффузии при переносе различных субстанций. Экспериментальные материалы подтверждают в общем это положение либо предполагают введение поправок, величина которых граничит с точностью экспериментов.

Размеры вихрей в атмосфере меняются от масштабов молекулярных образований до континентальных циклонов, при этом каждому размеру соответствует определенное время жизни вихря и

характерная частота пульсаций метеорологических параметров. Процессы эти носят случайный характер и описываются статистическими соотношениями.

Группы частиц среды, переходя от вихря к вихрю, меняют свои характеристики таким образом, что в среднем при наличии градиента концентрации в среде каждому из уровней соответствует определенное значение параметра. Это обусловливается тем, что при наличии беспорядочных движений в среде градиент концентрации задает направление предпочтительных перемещений.

Рассмотренный процесс перемешивания в турбулентном потоке в такой форме может существовать в случае, если в атмосфере отсутствуют градиенты температуры (равновесная стратификация). При наличии таковых собственная температура вихря может отличаться от температуры окружающих вихрей (среды). Под действием архимедовых сил вихри перемещаются: «теплые» поднимаются, а «холодные» опускаются в соответствии с естественными изменениями плотности под действием температуры при постоянном давлении. Если температура среды уменьшается с высотой, возникают условия термической конвекции (неустойчивая стратификация), при которых форсируются процессы обмена. Вихри с более высокой собственной температурой «всплывают» и распадаются в зоне более низких температур. На их место опускаются интенсивно воспринимающие тепло более холодные вихри из верхних слоев.

При росте температуры с высотой (устойчивая стратификация) действие архимедовых сил тормозит процессы турбулентного перемешивания, так как при попадании «теплого» вихря в более холодную среду он за счет эффекта плавучести стремится вернуться в более теплую зону, из которой вышел.

Процессы турбулентной диффузии чрезвычайно сложны и не исчерпываются рамками подобных приближенных схем. Исследования в этой области ведутся широким фронтом с привлечением новейших достижений науки и техники. Несмотря на это, многие кардинальные вопросы еще не разрешены. К их числу относится и один из важнейших вопросов, особенно существенный при атмосферных исследованиях: экспериментальная проверка равенства коэффициентов турбулентной диффузии тепла, водяного пара и других субстанций. Боуэн для условий ламинарного режима получил соотношение между потоками тепла и пара:

$$a = \frac{P}{LE} = 66 \cdot 10^{-5} p \frac{\Delta T}{\Delta e}, \qquad \text{(III.5)}$$

где p — давление в среде, ΔT и Δe — перепады температуры и влажности воздуха. Соотношение указывает на равенство констант обмена водяного пара и температуры, так как в нем нет показателей, зависящих от характеристик турбулентности. Эксперименты с испарителями подтвердили возможность применения этого соотношения в натурных условиях. Некоторые исследователи все же

оспаривают это положение. Имеются данные, в частности для травяного покрова, что соотношение (III.5) может меняться в довольно широких пределах при изменении стратификации атмосферы.

Были попытки оценить возможные пределы изменения соотношения Боуэна. Мы остановимся на основных положениях подобных расчетов несколько дальше, когда будем рассматривать метод турбулентной диффузии.

Несмотря на возможные ошибки, во многих исследованиях предполагается постоянство соотношения Боуэна во всем диапазоне рабочих условий, что в общем подтверждается большинством опытных материалов (с учетом точности экспериментов). Далее мы также будем основываться на этом положении.

Уравнения типа (III.4) используются при реализации определения потоков по методам теплового баланса и турбулентной диффузии.

Испаряемость. Прежде чем перейти к вопросу об использовании агрометеорологических параметров для оценки влагообеспеченности, необходимо уделить некоторое внимание проблеме определения максимально возможного испарения, или испаряемости. Этот параметр используется почти во всех методах оценки влагообеспеченности, хотя и в определении понятия испаряемости, и в степени полезности этого параметра у многих исследователей имеются существенные расхождения [1, 3, 5, 8, 9, 25, 48].

Большинство принимает общее определение испаряемости как максимально возможное испарение воды в атмосферу при неограниченном притоке ее к испаряющему телу. В такой формулировке испаряемость представляет собой интегральный показатель, совокупно характеризующий с позиций максимально возможного испарения весь комплекс условий (почвенных, биологических, метеорологических), существующих в поле. Но при этом часто жестко связывают само понятие испаряемости с конкретной методикой ее определения, что, конечно, не вполне правомерно, тем более, что методики эти в настоящий момент достаточно несовершенны и им свойственны значительные погрешности.

Долгое время в качестве испаряемости рассматривалось значение испарения с водной поверхности (по данным испарителей или малых водоемов), что, конечно, методически недостаточно обосновано. Для водной поверхности тепловой баланс изменяется весьма существенно, так как радиация проникает в воду и рассеивается в значительном слое. В связи с этим изменяется и режим турбулентного обмена (ослабляется). Поэтому измеренные для воды величины испаряемости оказываются значительно заниженными по сравнению с фактическим значением этого параметра для растительного покрова.

Наиболее распространенный метод измерения испаряемости — лизиметрический. Для таких измерений в лизиметре устанавливается уровень «грунтовых вод», обеспечивающий неограниченное

потребление влаги растением. Подобная аппаратура позволяет получать достаточно точные данные, но правильная организация наблюдений и устройство специальных лизиметрических площадок весьма сложны.

Для климатологических оценок широко распространены полуэмпирические и эмпирические расчетные формулы, которые связывают величины испаряемости с температурой и влажностью воздуха. Действительно, относительная влажность или дефицит влажности воздуха определяет потенциальные возможности среды с точки зрения увеличения концентрации водяного пара, а следовательно, эти параметры связаны с испаряемостью, так же как и температура воздуха, от которой зависит максимальная упругость насыщающих паров воды. С другой стороны, годовой ход температуры достаточно полно отражает ход и величину радиационного баланса, т. е. в конечном счете приток энергии, обеспечивающий испарение влаги.

Эмпирические формулы отражают корреляционные связи между указанными параметрами и испаряемостью, а коэффициенты в них в какой-то степени связаны с особенностями климатических зон, для которых эти формулы получены. К сожалению, их распространение на любые произвольные климатические условия приводит к существенным ошибкам. Пример этого приведен в табл. 13 [5], в которой сравниваются результаты расчетов по наиболее распространенным эмпирическим формулам с фактическими измерениями по месяцам.

Таблица 13

Сопоставление различных методов определения испаряемости

Расчетная формула или метод измерения	IV	V	VI	VII	VIII	IX	Сумма
Э. М. Ольдекоп $E_0=16{,}0d$	224	426	660	770	712	498	3290
А. М. Алпатьев $E_0=0{,}65\Sigma d$	197	386	570	700	648	435	2937
Н. Н. Иванов $E_0=0{,}0018\ (t+25)^2\times\times(100-r)$	168	290	390	420	430	310	2008
С. И. Костин $E_0=\frac{nd}{4}\ (1+0{,}004t)^2$	86	177	281	338	310	201	1393
Г. Т. Селянинов $E_0=0{,}1\Sigma T$	48	72	84	95	91	72	462
Лизиметры (Теджен, 1958—1963 гг.)	75	103	150	231	323	139	1021
Испарительный бассейн (Ашхабад)	106	182	256	281	253	176	1254

Примечание. Обозначения в формулах: E_0 — испаряемость, d — дефицит влажности воздуха, T — температура воздуха выше определенного уровня, n — период наблюдений, t — средняя температура за период наблюдений, r — относительная влажность воздуха, средняя за период наблюдений.

Некоторые исследователи применяют зависимости типа формулы Пенмана:

$$E_0 = \frac{\varphi' R + 0{,}5 d f(u)}{\varphi' + 0{,}5}, \qquad \text{(III.6)}$$

где d — дефицит насыщения воздуха водяным паром, $f(u)$ — функция скорости ветра, учитывающая влияние изменений коэффициента обмена, φ' — производная от насыщающей влажности воздуха при температуре среды. Подобные формулы обычно жестко привязаны к определенной стратификации, так как при их выводе используются модели для коэффициента обмена, как правило, привязанные к стратификации. В этом существенное ограничение возможностей использования формул типа (III.6), так как нет достаточно полной модели для оценки изменений коэффициента обмена при разной стратификации.

Принципиально возможен еще один полевой метод определения испаряемости. Он основывается на энергетическом подходе к определению испаряемости, предложенном М. И. Будыко [4, 25]. В этом случае за испаряемость принимается такое испарение, когда при максимально возможном притоке энергии к испаряющей поверхности вся она расходуется только на испарение. Для нормальных условий равновесной и неустойчивой стратификаций максимально возможный приток тепла к деятельной поверхности соответствует условиям отсутствия теплоотдачи в воздух ($P=0$). Испаряемость $E_0 = \frac{R-B}{L}$, так как на парообразование не может тратиться больше энергии, чем приходит от солнца (тепловой поток в почву вычитается как постоянно действующий фактор). В таком случае нет необходимости в дополнительных измерениях испаряемости при полной влагообеспеченности поля. Более того, так как лимитирующим фактором является приходящая энергия, испаряемость для таких условий не зависит от наличия и степени развития растительного покрова. Как уже отмечалось, подобные условия в дневное время наблюдаются в зоне достаточного увлажнения и связаны обычно с относительно небольшими величинами радиационного баланса при достаточно высоком уровне влажности воздуха.

В аридной зоне указанные условия выполняются для довольно больших площадей (бассейнов), включающих не только сельскохозяйственные поля, но и массивы с естественной для этой зоны подстилающей поверхностью.

При наличии инверсии в приземном слое, когда турбулентный поток меняет знак, общий приток энергии складывается из $(R \dot{-} B)$ и P; ни радиационный баланс, ни сумма $P+(R-B)$ не могут характеризовать величину испаряемости, так как лимитирующим фактором становится влагообеспеченность сельскохозяйственного поля. Условие смыкания теплового баланса в этом случае $LE = P + R - B$, а само значение испарения может быть ограничено либо физиоло-

гическими характеристиками растительного покрова, либо дефицитом почвенной влаги.

Такие условия в приземном слое атмосферы наблюдаются в вечерние и ночные часы при отрицательных радиационных балансах, а также при развитом оазисном эффекте. В обоих случаях глубина инверсии, а следовательно, и значение турбулентного потока тепла, являющегося важным приходным элементом теплового баланса, будут зависеть от наличия и объема зеленой массы растительного покрова. Именно объем зеленой массы будет определять как интенсивность радиационного выхолаживания (для ночных инверсий), так и охлаждение за счет транспирации (для режима оазисного эффекта).

Эксперимент показал, что подобная зависимость для поливного поля может быть получена при синхронных теплобалансовых и биометрических наблюдениях. Значение испаряемости измеряется

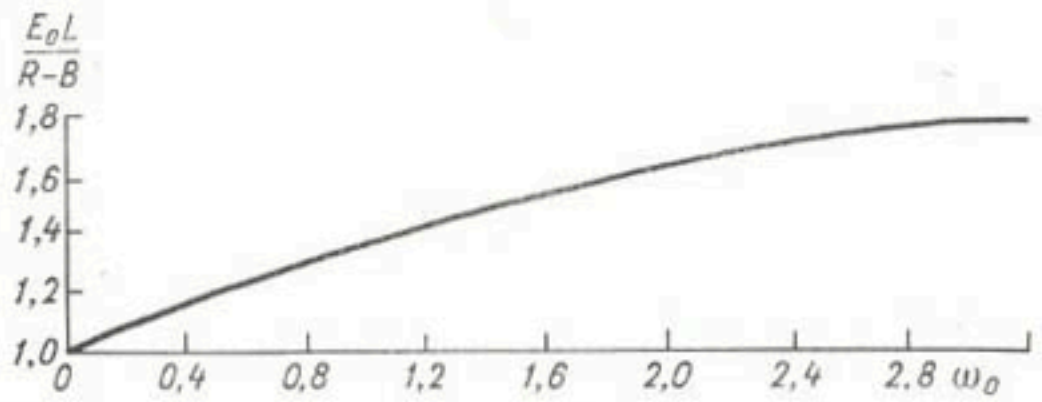


Рис. 45. Зависимость испаряемости E_0 от степени развития растительного покрова (листового индекса ω_0) для хлопчатника (Ашхабад).

непосредственно на опытной площадке с помощью обычной теплобалансовой аппаратуры. Так как значение E_0 равно максимально возможному суммарному испарению E при полной влагообеспеченности, непосредственное измерение E через 2—3 дня после полива даст интересующее нас значение испаряемости. Выбор интервала выдержки связан с тем, что в момент полива в поверхностных слоях почвы появляется избыточная влага, которая постепенно распределяется по всему активному слою почвы. Время установления равновесной влажности, равной полевой влагоемкости и лежащей в пределах оптимальных условий влагообеспеченности растений, определяется гидрофизическими характеристиками почвы.

Экспериментально полученная для хлопка зависимость испаряемости от величины листового индекса ω_0 [5] приведена на рис. 45. Аналогичная зависимость может быть получена для индекса объема зеленой массы (объем зеленой массы, приходящийся на единицу площади поля). Уравнение регрессии для графика рис. 45, имеющее вид

$$\frac{LE_0}{R-B} = 1 + 0{,}41\omega_0 - 0{,}5\omega_0^2, \qquad \text{(III.7)}$$

по существу является характеристикой интенсивности развития оазисного эффекта, так как позволяет оценить рост притока тепла из воздуха к деятельной поверхности растительного покрова по мере увеличения испаряющей площади растительного покрова. Очевидно, что для данного случая приток тепла из воздуха составляет существенную часть теплового баланса (до 80% основного притока за счет радиации). Для таких условий инверсионное распределение температуры в приземном слое воздуха будет устойчивым. Оценка испаряемости в условиях инверсии по общим метеорологическим характеристикам невозможна, и в этом случае необходима организация специальных измерений.

§ 2. Основные методы измерения испарения

Метод турбулентной диффузии характеризуется тем, что при его использовании коэффициенты обмена определяются по экспериментальным данным из профилей скорости ветра. Так как точное определение коэффициента обмена K весьма сложно и трудоемко, обычно при реализации метода турбулентной диффузии используются приближенные модели, позволяющие рассчитать K по данным о скорости ветра на 2—3 горизонтах.

Потоки тепла и водяного пара определяются по соотношениям:

$$LE = -\rho K \frac{\overline{\partial q}}{\partial z}, \qquad \text{(III.8)}$$

$$P = -c_p \rho K \frac{\overline{\partial T}}{\partial z}, \qquad \text{(III.9)}$$

где ρ — плотность воздуха, а c_p — удельная теплоемкость воздуха. Более или менее строгому теоретическому анализу поддается случай равновесной стратификации. Для него в соответствии с теорией Прандтля—Кармана получена расчетная формула

$$K_0 = \varkappa^2 \frac{u_2 - u_1}{\ln z_2/z_1 \ln z_3/z_4}. \qquad \text{(III.10)}$$

Здесь u_1, u_2 — значения скорости на высотах z_1 и z_2 соответственно; $\varkappa$ — постоянная Кармана; z_3 и z_4 — уровни, на которых измеряется перепад «концентрации» переносимой субстанции.

Аналогичный вариант формулы предложен Пасквиллом:

$$K_0 = m u_2, \qquad \text{(III.11)}$$

где

$$m = \varkappa \frac{1 - u_1/u_2}{(\ln z_2/z_1)^2}.$$

В данном случае имеется в виду, что скорость и переносимая субстанция измеряются на одинаковых уровнях z_1 и z_2.

Кроме того, установлено, что значение коэффициента определяется видом подстилающей поверхности и может быть измерено и вычислено предварительно. Для расчета K_0 в этом случае необходимы только оперативные измерения скорости ветра на одной высоте (u_2).

Как показала проверка, подобные расчетные методы весьма ограниченны в отношении области применения не только условиями равновесной стратификации, но и требованиями малой высоты растительности.

Вывод формул (III.10) и (III.11) основывается на логарифмическом законе распределения метеорологических элементов в приземном слое при равновесной стратификации. Отклонения от этого закона при изменении стратификации были причиной разработки ряда моделей, более успешно отражающих ход метеоэлементов в различных условиях. Каждой из этих моделей соответствует расчетная формула для K.

Наиболее удобна при расчетах функциональная связь коэффициента обмена с числом Ричардсона Ri, характеризующим степень устойчивости атмосферы ($\mathrm{Ri} < 0$ — инверсия, $\mathrm{Ri} = 0$ — изотермия, $\mathrm{Ri} > 0$ — неустойчивая стратификация).

Наиболее обоснованные формулы для расчета коэффициента обмена имеют вид

$$K = K_0 \gamma \sqrt{1 - \psi \mathrm{Ri}}; \qquad \text{(III.12)}$$

здесь K_0 — коэффициент обмена при равновесных условиях, определяемый формулами типа (III.10) и (III.11); γ и ψ — коэффициенты, слабо зависящие от типа стратификации.

Несмотря на обоснованность расчетных формул, практическое использование их приводит к заметным ошибкам (завышение значений при инверсии и занижение при неустойчивой стратификации). Предполагают, что это связано с различиями в коэффициентах обмена для разных субстанций, которые не учитываются в формулах, построенных на полуэмпирической теории Прандтля—Кармана. В работе А. Р. Константинова [11] предложены поправочные коэффициенты α_τ и α_e, учитывающие отклонения эффективных градиентов субстанций (определяющих фактические процессы обмена) от средних градиентов (для которых ведутся расчеты по приведенным выше формулам). Значения α_τ и α_e зависят от величины критерия Ri, но, как отмечает сам автор, поправка изменяет вычисленные значения потоков в пределах возможных погрешностей измерений. При этом поправки к соотношению Боуэна имеют существенное значение, так как в зависимости от критерия и значения шероховатости подстилающей поверхности α_τ/α_e изменяется в пределах 1—1,5.

Метод теплового баланса удобен тем, что при небольшом числе измеряемых величин позволяет определить большой комплекс параметров. Несложные расчетные формулы дают возможность автоматизировать вычисления.

Если в уравнение теплового баланса

$$R = B + LE + P \qquad \text{(III.13)}$$

подставить значения потоков тепла и пара по (III.8) и (III.9)

$$P = \rho c_p K \frac{\overline{\partial T}}{\partial z} \approx aK \frac{\Delta T}{\Delta z},$$

$$LE = L\rho K \frac{\overline{\partial q}}{\partial z} \approx bK \frac{\Delta e}{\Delta z},$$

то несложно получить формулы для расчета коэффициента обмена:

$$K = \Delta z \frac{R - B}{b\,\Delta e + a\,\Delta T} \qquad \text{(III.14)}$$

и соответствующих потоков:

$$P = a \frac{(R - B)\,\Delta T}{b\,\Delta e + a\,\Delta T}, \qquad \text{(III.15)}$$

$$LE = b \frac{(R - B)\,\Delta e}{b\,\Delta e + a\,\Delta T}. \qquad \text{(III.16)}$$

Чаще всего эти формулы используются с численными коэффициентами, определяемыми значениями констант и размерностями исходных величин,

$$P = 0{,}64 \frac{(R - B)\,\Delta T}{\Delta e + 0{,}64\Delta T}\Bigg|_{\Delta e\ \text{мбар}} = 0{,}48 \frac{(R - B)\,\Delta T}{\Delta e + 0{,}48\,\Delta T}\Bigg|_{\Delta e\ \text{мм Hg}}, \qquad \text{(III.15а)}$$

$$LE = \frac{(R - B)\,\Delta e}{\Delta e + 0{,}64\Delta T}\Bigg|_{\Delta e\ \text{мбар}} = \frac{(R - B)\,\Delta e}{\Delta e + 0{,}48\Delta T}\Bigg|_{\Delta e\ \text{мм Hg}}. \qquad \text{(III.16а)}$$

Вывод формул расчетной схемы метода теплового баланса не обусловлен допущениями, связанными с определенной стратификацией. Он основан по существу на уравнении теплового баланса и не содержит дополнительных ограничений, за исключением положения о равенстве коэффициентов обмена для тепла и пара. В связи с этим все отмеченное выше о возможных ошибках метода турбулентной диффузии может быть отнесено и к методу теплового баланса, кроме ошибок моделирования коэффициента обмена, которые в данном случае исключаются.

Необходимо еще раз подчеркнуть, что для исключения локальных ошибок из-за разброса метеопараметров вследствие микронеоднородностей подстилающей поверхности, необходимо увеличивать высоту размещения датчиков над подстилающей поверхностью. При выборе этой высоты нельзя забывать, что модель теплового баланса не учитывает наличия адвективных горизонтальных потоков, а потому верхний предел размещения датчиков ограничен. Последнее замечание особенно важно в условиях оазисного эффекта, когда сама расчетная схема теплового баланса остается правомерной, но погрешности измерений могут увеличиваться.

Корреляционный метод измерения турбулентных потоков является единственным непосредственным методом, который не связан с какими-либо промежуточными моделями обмена в приземном слое воздуха. В отличие от рассмотренных выше, корреляционный метод может быть относительно просто приспособлен для измерений потоков в условиях явной адвекции, как вертикальной, так и горизонтальной. Корреляционный метод по существу может использоваться как эталонный для оценки погрешностей других методов. До последнего времени, несмотря на такие достоинства, корреляционный метод практически не использовался, хотя принципиальные основы его были разработаны в начале 50-х годов. Это объясняется трудностями приборной реализации измерений, особенно таких, как вертикальная составляющая ветра и поток пара. При измерениях корреляционным методом определяется поток пара через верхнюю границу столба воздуха (в соответствии со схемой баланса пара; см. рис. 42).

Далее принципиальные основы этого метода будут рассмотрены подробнее.

§ 3. Погрешность расчетных методов определения агрометеорологических показателей влагообеспеченности

При использовании расчетных методов определения агрометеорологических показателей влагообеспеченности необходимо оценивать точность расчета и выбирать структуру системы сбора информации таким образом, чтобы обеспечивался необходимый минимум погрешности в рассчитанных показателях [19]. Поскольку входные параметры определяются с некоторой погрешностью, при любой точности расчета и любых вариантах реализации вычислений (ручной расчет, специализированные вычислители, универсальные цифровые электронные машины) значения параметров будут рассчитаны также с некоторой погрешностью. Рассмотрим трансформированную погрешность определения агрометеорологических показателей, которая представляет часть общей погрешности, связанную с неточным вводом в расчет входных параметров.

В зависимости от методики наблюдений и характера погрешностей датчиков точность расчета будет изменяться в широких пределах. Проведенный анализ ошибок основан на предположении о независимости погрешности датчиков, которое не всегда выполняется на практике (в частности, при определении перепада влажности воздуха психрометрическим методом не вполне правильно считать независимыми ошибки в определении перепада температуры и влажности). Кроме того, предполагается, что погрешности входных параметров по характеру являются случайными и подчиняются равномерному распределению. Последнее эквивалентно требованию исключения систематических погрешностей с помощью поправок к измеренным значениям входных параметров.

С точки зрения возможности выбора метода измерений желательно рассмотреть как трансформированную погрешность единичного измерения, так и трансформированную погрешность серии отсчетов при условии, что осуществляется осреднение по выходным параметрам.

Метрологической характеристикой расчетной схемы является максимальная погрешность единичного измерения, характеризующая наибольшую из возможных ошибок выходного параметра, возможную при наихудшем сочетании погрешностей входных элементов. Поскольку при практической реализации измерений вероятность появления такого сочетания частных значений погрешностей исходных параметров весьма мала, фактическая точность определения расчетных показателей более полно характеризуется средней квадратичной погрешностью единичного измерения. В этом показателе автоматически учитываются вероятностные характеристики ошибок исходных параметров, и он может практически использоваться для оценки точности вычислений в реальных условиях. Необходимые формулы для расчета трансформированной погрешности могут быть получены на основании теории погрешностей.

При наличии функциональных зависимостей между входными и выходными параметрами трансформированная погрешность может быть определена по следующим соотношениям:

максимальная погрешность

$$\delta F(x,\ y) = \frac{\partial F(x,\ y)}{\partial x}\delta x + \frac{\partial F(x,\ y)}{\partial y}\delta y, \qquad \text{(III.17)}$$

средняя квадратичная погрешность

$$\overline{\sigma_F^2} = \left[\frac{\partial F(x,\ y)}{\partial x}\right]^2 \overline{\sigma_x^2} + \left[\frac{\partial F(x,\ y)}{\partial y}\right]^2 \overline{\sigma_y^2}. \qquad \text{(III.18)}$$

В качестве типичного примера рассмотрим трансформированную погрешность для расчетной схемы метода теплового баланса. Этот метод представляет наибольший интерес для практических целей, он наиболее обеспечен аппаратурой для измерений входных элементов и автоматической аппаратурой для расчетов элементов теплового баланса.

При известных погрешностях определения входных параметров наибольшие ошибки в вычисленных функциях имеют место при малых значениях входных параметров, когда относительное значение ошибки становится большим. В связи с этим анализ погрешностей дает возможность ориентировочно оценить пороговые значения входных параметров — минимальные значения, при которых еще обеспечивается необходимая достоверность определяемых функций.

Для практического использования оценок влагообеспеченности наибольший интерес представляет определение погрешности вычисления суммарного испарения LE и значения такого параметра, как

коэффициент влагообеспеченности $\beta = \dfrac{\Delta e}{\Delta e + 0{,}64\Delta T}$, при использовании расчетной схемы метода теплового баланса.

Максимальная трансформированная относительная погрешность для единичного измерения может быть вычислена по формуле, полученной на основе (III.16),

$$\Delta_E = \frac{\delta(LE)}{LE} = \frac{\delta(R-B)}{R-B} + 0{,}64\,\frac{\Delta T\,\delta(\Delta e) + \Delta e\,\delta(\Delta T)}{\Delta e\,(\Delta e + 0{,}64\Delta T)}. \qquad \text{(III.19)}$$

Этот же параметр для коэффициента влагообеспеченности вычисляется по формуле

$$\Delta_\beta = \frac{\delta\beta}{\beta} = 0{,}64\,\frac{\Delta T\delta(\Delta e) + \Delta e\delta(\Delta T)}{\Delta e\,(\Delta e + 0{,}64\Delta T)}. \qquad \text{(III.20)}$$

В этих выражениях δ — максимальная абсолютная погрешность определения параметра.

На основе тех же исходных расчетных формул могут быть получены и соотношения для определения средней квадратичной погрешности единичного измерения для испарения $\overline{\sigma_E}$ и коэффициента влагообеспеченности $\overline{\sigma_\beta}$:

$$\frac{\overline{\sigma_E^2}}{E^2} = \frac{1}{6}\left[\frac{\delta(R-B)}{R-B}\right]^2 + \frac{1}{6}\left[\frac{0{,}64\Delta T\,\delta(\Delta e)}{\Delta e\,(\Delta e + 0{,}64\Delta T)}\right]^2 + \frac{1}{6}\left[\frac{0{,}64\delta(\Delta T)}{\Delta e + 0{,}64\Delta T}\right]^2, \qquad \text{(III.21)}$$

$$\frac{\overline{\sigma_\beta^2}}{\beta^2} = \frac{1}{6}\left(\frac{0{,}64}{\Delta e + 0{,}64\Delta T}\right)^2 \frac{[\Delta T\,\delta(\Delta e)]^2 + [\Delta e\,\delta(\Delta T)]^2}{(\Delta e)^2}. \qquad \text{(III.22)}$$

Здесь приближенно принято соотношение между средней квадратичной и максимальной погрешностями единичного измерения $\overline{\sigma_R} \approx \dfrac{\delta R}{6}$ и т. д., справедливое при равномерном распределении ошибок.

Аналогичные по структуре формулы могут быть получены для погрешности определения турбулентного потока тепла, потока углекислого газа в приземном слое атмосферы, коэффициента турбулентного обмена, рассчитываемым по схеме метода теплового баланса.

При анализе возможных погрешностей для реализации метода теплового баланса аппаратуру измерения входных элементов удобно разделить на три группы по точности измерений. Далее будут рассматриваться существующие приборы для таких измерений.

Первая группа приборов по точности ориентировочно соответствует наиболее распространенной стандартной аппаратуре, прен-

мущественно применяемой на сети станций Гидрометслужбы. К приборам этой группы относятся аспирационные психрометры, данные которых обрабатываются по психрометрическим таблицам, радиационные балансомеры без ветровой защиты и т. п.

Поскольку в обычных условиях покрытого растительностью поля тепловой поток в почву, как правило, не превышает 10—15% радиационного баланса, можно, не допуская большой ошибки, считать $\delta(R-B) \approx \delta R$, полагая, что ошибка в определении потока тепла в почву существенно меньше ошибки в определении радиационного баланса.

Вторая группа приборов ориентировочно соответствует параметрам более современной аппаратуры. Для приборов этого класса характерно применение схем, обеспечивающих прямое измерение величины $R-B$ и градиентов температуры и влажности воздуха в приземном слое. В качестве примера аппаратуры этой группы ниже рассмотрим комплект датчиков теплового баланса Агрофизического научно-исследовательского института.

Приборы третьей группы можно реализовать на современном уровне измерительной техники. Но в настоящее время нет еще реальных прототипов подобной аппаратуры и целесообразность разработки их недостаточно ясна, так как, по-видимому, эта группа приборов по характеристикам выходит за необходимые технически обоснованные пределы точности измерений как во времени, так и в пространстве. Этот вопрос будет предметом более подробного рассмотрения.

Фактические значения погрешностей измерения $\pm\delta$ исходных параметров приведены в табл. 14.

Таблица 14

Характеристика точности датчиков

Параметр	Группа приборов		
	1	2	3
$\delta(\Delta e)$ мбар	0,2	0,05	0,01
$\delta(\Delta T)$ °С	0,2	0,05	0,01
$\delta(R-B)$ кал/см²мин.	0,02	0,01	0,002

Результаты расчета погрешностей по формулам (III.19) и (III.20) приведены в табл. 15 и 16.

Как уже отмечалось, наибольшие относительные погрешности будут наблюдаться при малых значениях входных параметров. Исходя из этого, погрешность оценивалась в диапазоне изменений входных параметров 5—50% от значений, встречающихся на практике. Из табл. 15 и 16 видно, что выше пределов указанного диапазона ошибки становятся достаточно малыми.

Таблица 15

Погрешность расчета испарения LE (%)

ΔT °С	Δe мбар	Группа приборов								
		1			2			3		
		$R-B$ кал/см²мин.								
		0,05	0,25	0,50	0,05	0,25	0,50	0,05	0,25	0,50
0,1	0,1	200	160	160	59	43	41	12	8,6	8,2
	0,5	67	35	31	27	11	8,8	5,4	2,2	1,8
	1,0	53	21	17	23	7,3	5,3	4,6	1,4	1,0
0,5	0,1	220	190	190	66	50	48	13	9,9	9,5
	0,5	71	39	35	28	12	9,8	5,6	2,4	2,0
	1,0	55	23	19	24	7,6	5,6	4,7	1,5	1,1
1,0	0,1	230	200	190	68	52	50	13	10	9,9
	0,5	74	42	38	28	12	10	5,7	2,5	2,1
	1,0	56	24	20	24	7,9	5,9	4,8	1,6	1,2

Таблица 16

Погрешность определения коэффициента влагообеспеченности β (%)

ΔT °С	Группа приборов								
	1			2			3		
	Δe мбар								
	0,1	0,5	1,0	0,1	0,5	1,0	0,1	0,5	1,0
0,1	160	27	13	39	6,8	3,3	7,8	1,4	0,6
0,5	180	31	14	46	7,8	3,6	9,1	1,6	0,7
1,0	190	34	16	48	8,4	3,9	9,5	1,7	0,8

Результаты расчета средней квадратичной погрешности представлены в табл. 17 и 18.

По приведенным данным видно, что максимальная погрешность может превышать среднюю квадратичную в 3—4 раза. На величины погрешностей LE и β особенно сильно влияет изменение значения Δe вблизи пороговой величины. Остальные параметры, входящие в расчетные формулы, влияют на точность расчета значительно меньше. При единичном отсчете допустимая погрешность может быть получена при использовании датчиков второй группы. Датчики первой группы дают большие ошибки, и для их практи-

Таблица 17

Средняя квадратичная погрешность испарения LE (%)

ΔT °C	Δe мбар	Группа приборов								
		1			2			3		
		$(R-B)$ кал/см²мин.								
		0,05	0,25	0,50	0,05	0,25	0,50	0,05	0,25	0,50
0,1	0,1	47	45	45	14	11	11	2,8	2,3	2,2
	0,5	19	9,9	9,5	8,4	2,8	2,5	1,7	0,6	0,5
	1,0	17	5,9	5,1	8,2	2,0	1,5	1,6	0,4	0,3
0,5	0,1	65	63	63	18	16	16	3,5	3,2	3,1
	0,5	19	9,5	9,1	8,4	2,8	2,4	1,7	0,6	0,5
	1,0	17	5,5	4,7	8,2	2,0	1,4	1,6	0,4	0,3
1,0	0,1	72	71	70	19	18	18	3,9	3,5	3,5
	0,5	19	11	10	8,4	3,0	2,7	1,7	0,6	0,5
	1,0	17	5,5	2,8	8,2	2,0	1,4	1,6	0,4	0,3

Таблица 18

Средняя квадратичная погрешность коэффициента влагообеспеченности β(%)

ΔT °C	Группа приборов								
	1			2			3		
	Δe мбар								
	0,1	0,5	1,0	0,1	0,5	1,0	0,1	0,5	1,0
0,1	45	9,4	4,9	11	2,3	1,2	2,2	0,5	0,2
0,5	63	9,0	4,2	16	2,2	1,1	3,1	0,4	0,2
1,0	70	10	4,5	18	2,5	1,1	3,5	0,5	0,2

ческого использования нужны методы измерения, обеспечивающие снижение общей погрешности. Кроме того, следует иметь в виду, что при минимальных значениях исходных параметров результат измерения будет недостоверен, так как уровень полезного сигнала существенно меньше уровня помехи (случайной ошибки измерений). В подобной ситуации недостаточно точна и сама примененная методика оценки трансформированной ошибки; максимальная погрешность может быть еще больше, чем приведенная в табл. 15 и 16.

Обычно при решении измерительных задач с помощью недостаточно точной аппаратуры, погрешности отсчета которой случайны, повышение точности может быть достигнуто при осреднении параметра по серии отсчетов. В этом случае дисперсия для осредненного значения будет уменьшаться по закону

$$\overline{\sigma_n^2} = \frac{\overline{\sigma_1^2}}{n}, \qquad \text{(III.23)}$$

где n — число отсчетов в серии. Осреднение по n отсчетов для входных параметров равноценно повышению точности датчиков, и, применяя его, можно относительно просто достигнуть необходимых характеристик погрешности. Этот путь возможен при ручной обработке данных или при использовании универсальных вычислительных машин. Специализированная вычислительная техника обычно производит вычисления для единичного отсчета входных параметров, и в этом случае осреднению подлежат вычисленные значения параметров теплового баланса.

Для того чтобы датчики первой группы обеспечили такую же точность, как и датчики второй группы, достаточно осреднить входные параметры по 12—15 отсчетам. Такое же осреднение необходимо для приведения погрешности датчиков второй группы к характеристикам датчиков третьей группы. В реальных условиях осреднение входных параметров необходимо также и для исключения влияния пульсаций и для получения данных, репрезентативных во времени. Так, например, стандартная методика измерений приборами первой группы предусматривает расчет элементов теплового баланса по среднечасовым значениям параметров, определяемым из 5 отсчетов серии. Для этих условий наибольшая средняя квадратичная погрешность при определении испарения будет приблизительно 20%. При работе аппаратуры второй группы точность среднечасовых значений определяется из 10—15 отсчетов. Для этого случая $\overline{\sigma_E^2}/E \approx 5\%$.

Равноточные измерения суточного хода испарения или других параметров можно обеспечить, меняя число отсчетов в серии наблюдений обратно пропорционально изменению абсолютной величины параметра (для больших значений параметров n мало, для малых — велико).

Вопрос о погрешностях измерений имеет решающее значение при попытках использования расчетной схемы метода теплового баланса для определения значений потоков тепла за малые интервалы времени. При получении сумм потоков за сутки или бóльшие интервалы времени относительная погрешность не превышает допустимых значений. Это связано, во-первых, с существенным увеличением числа отсчетов параметров и соответствующим снижением общей погрешности. Кроме того, уже в суточной сумме, например, испарения основную часть составляет дневное испарение, рассчитываемое, как правило, по относительно большим значениям

входных параметров и соответственно с небольшими погрешностями. Относительно малые величины испарения, наблюдаемые в ночное время и в переходные периоды суток и рассчитываемые с большими погрешностями, составляют в сумме небольшую часть суточного количества, и общая вносимая ошибка при этом также незначительна. Вследствие этого возможно определение сумм потоков за большие интервалы времени с точностью порядка 5—10%.

§ 4. Комплект датчиков теплового баланса

В зависимости от принятого метода расчета агрометеорологических показателей влагообеспеченности для измерений исходных параметров используется различная аппаратура. Большинство рассмотренных вариантов расчета может быть реализовано с помощью стандартной метеорологической аппаратуры при условии, если применяется метод измерений, обеспечивающий необходимую точность. Это относится и к методу турбулентной диффузии, и к расчетной схеме метода теплового баланса во всех ее модификациях.

Расчетная схема метода теплового баланса распространена наиболее широко. Именно эта схема используется на сети теплобалансовых метеорологических станций системы Гидрометслужбы, а также при различных специальных исследованиях. При этом в подавляющем большинстве случаев практическая реализация метода базируется на стандартной аппаратуре, принятой на сети Гидрометслужбы [34].

Для измерений радиационного баланса применяется обычно балансомер Янишевского, представляющий собой дифференциальную термобатарею, спаи которой прикрыты зачерненными приемными пластинами. Датчик балансомера устанавливается на стандартной высоте в горизонтальном положении так, что одна из его рабочих площадок обращена к деятельной поверхности, а вторая — к небесному своду. Во время работы датчика разность температур между приемными площадками пропорциональна величине радиационного баланса. Так как рабочие поверхности датчика свободно обдуваются ветром, их температура зависит от интенсивности теплоотдачи, а следовательно, от скорости ветра в приземном слое. В связи с этим при измерениях радиационного баланса стандартными балансомерами необходимо одновременно измерять скорость ветра и вводить соответствующие поправки в отсчет баланса.

Определение теплового потока в почву производится с помощью термоэлектрических тепломеров, устанавливаемых в почве на глубине 2—5 см. Тепломер представляет собой дифференциальную термобатарею, «холодные» и «горячие» спаи которой размещаются на плоских приемных площадках датчика. Форма и размеры тепломера выбираются при проектировании датчика с учетом минимальных искажений естественного температурного поля в почве при установке датчика в месте измерений.

Градиенты температуры и влажности воздуха рассчитываются по данным, полученным с помощью стандартных аспирационных психрометров, установленных на заданных стандартных высотах (0,5 и 2,0 м над уровнем деятельной поверхности). При этом непосредственно измеряются значения температуры по сухому и смоченному термометрам психрометра, а упругость паров воды определяется при обработке материалов наблюдений по психрометрическим таблицам.

Комплект стандартной аппаратуры рассчитан на работу наблюдателей в поле непосредственно на участке установки датчиков. Дистанционный отсчет и автоматическая регистрация показаний для психрометров практически невозможны, так как до последнего времени в серийно выпускаемых приборах применяются ртутные термометры с визуальным отсчетом и ручным смачиванием увлажненного термометра. В исследовательской работе иногда применяются психрометры с металлическими термометрами сопротивления и автоматическим смачиванием, допускающие удаление измерителя на несколько десятков метров от места установки датчика. Такие приборы обычно изготавливаются в единичных экземплярах по чертежам исследователей. Но даже в этом случае дистанционный отсчет и автоматическая регистрация результатов наблюдений связаны со значительными трудностями вследствие малой чувствительности датчиков, низкого уровня сигналов и слабой помехозащищенности измерительной аппаратуры.

Погрешность измерений радиационного баланса и потока тепла в почву около $\pm 0{,}02$ кал/см^2 мин. Точность измерений температуры для термометров психрометрических датчиков порядка $\pm 0{,}1^\circ$ С, что обеспечивает погрешность определения градиентов температуры не менее $\pm 0{,}2^\circ$ С. Ошибка определения градиентов влажности воздуха с учетом точности психрометрических таблиц не менее $\pm 0{,}2$—0,3 мбар.

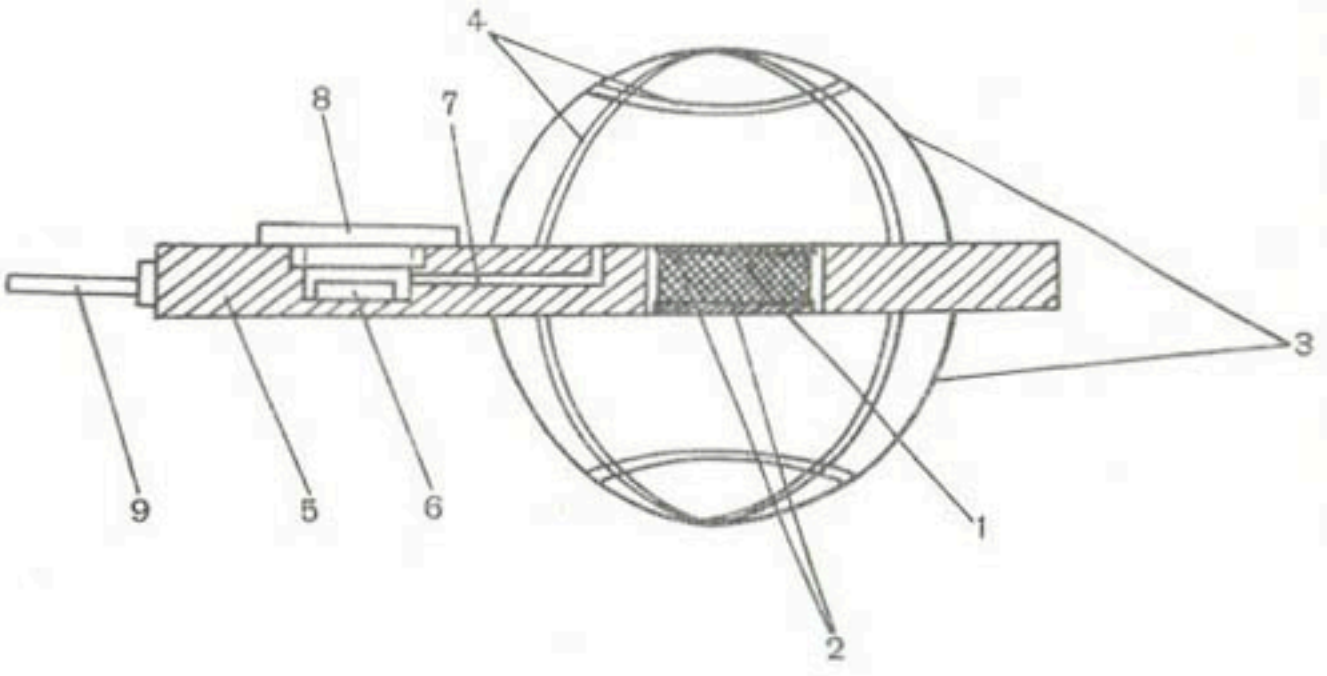
Стандартные методы измерений и приборы широко известны и описаны в специальных наставлениях Гидрометслужбы метеорологическим станциям. В связи с этим целесообразно более подробно остановиться на новой аппаратуре, обладающей повышенной точностью и открывающей возможность автоматической регистрации результатов наблюдений, а также решения вопроса о полной автоматизации измерений и обработки данных.

При реализации различных методов оценки влагообеспеченности по агрометеорологическим характеристикам и, в частности, в случаях применения расчетных схем теплового и водного баланса необходимую информацию можно получить с помощью разработанного в Агрофизическом институте (АФИ) комплекта датчиков теплового баланса, обеспечивающего получение комплексной информации на полуавтоматической аппаратуре повышенной точности. Комплект датчиков теплового баланса АФИ [41, 42] содержит радиационный балансомер, почвенный тепломер, психрометрический градиентомер температуры и влажности воздуха, а также изме-

рительный блок с регистратором, обеспечивающий получение информации в форме непрерывной записи на ленте электронного потенциометра.

1. **Радиационный балансомер** конструкции АФИ (модель БМ-2) представляет собой неселективный ветронезависимый приемник радиации (рис. 46 *а*). Чувствительным элементом балансомера является дифференциальная электролитическая термобатарея (рис. 46 *б*).

а)



б)

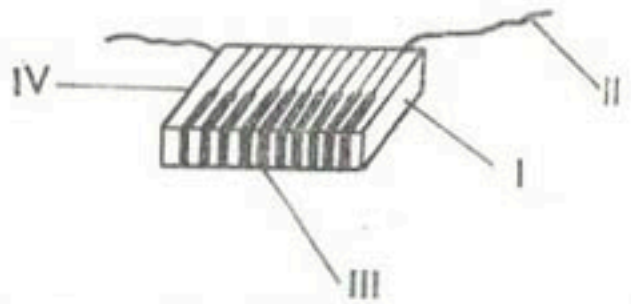


Рис. 46. Радиационный ветронезависимый балансомер АФИ (*а*) и электролитическая термобатарея (*б*).

1 — электролитическая термобатарея, *2* — приемные площадки, *3* — пленочный ветровой экран, *4* — каркас ветрового экрана, *5* — корпус, *6* — осушитель, *7* — канал осушителя, *8* — крышка камеры осушителя, *9* — держатель балансомера; *I* — пластина, *II* — константановая проволока, *III* — электролитическое покрытие (медь или серебро), *IV* — линия термоспаев.

В процессе ее изготовления на держатель из изоляционного материала (пластмасса) наматывается константановая проволока. Диаметр проволоки и шаг намотки выбираются в зависимости от конструкции и назначения дифференциальной термобатареи. Далее на половину всех витков заготовки электролитически наносится слой меди. Покрытие производится в растворе сернокислой меди. Однородность и плотность покрытия обеспечиваются благодаря малой плотности тока электролиза и специального держателя, за счет которого скорость осаждения меди одинакова для всех витков

заготовки. Технологический цикл покрытия включает обезжиривание и травление заготовок, меднение и последующую нейтрализацию, а также тщательную промывку деталей.

Нанесенный слой меди шунтирует константановый керн и образует с непокрытой частью проволоки (вторая половина витка) термопару медь-константан. Известно, что в дифференциальных термопарах аналогичной конструкции термоэдс заметно снижается по сравнению с табличным значением параметра для этой пары металлов и колеблется в пределах 32—36 мкв/град.

Конструкция балансомера представлена на рис. 46 *а*. Батарея дифференциальных термопар монтируется в центре платы и закрывается с обеих сторон медными приемными пластинами. В собранном приборе поверхности приемных пластин зачерняются стандартным актинометрическим лаком. Ветровая защита обеспечивается двумя экранами из тонкой полиэтиленовой пленки (20—50 мкм) на легких полусферических каркасах из никелевой проволоки. Применение ветровых экранов вызывает уменьшение чувствительности балансомера на 5—7% за счет затенения чувствительного элемента и поглощения радиации пленкой. Так как толщина этой пленки мала, сдвигов в спектральном составе излучения, приходящего на приемные пластины, практически нет.

Балансомер снабжен сменным осушителем (силикагель), предупреждающим конденсацию влаги на внутренней поверхности ветрового экрана. В нерабочем состоянии датчик закрывается двумя металлическими полусферическими чехлами. При снятых чехлах приходящая радиация полностью поглощается черными приемными пластинами балансомера, которые при этом нагреваются. Изменение температуры пластин пропорционально интенсивности падающей радиации. В этих условиях дифференциальная термобатарея вырабатывает термоэдс, пропорциональную разности температур между приемными пластинами. Следовательно, выходной сигнал соответствует разности энергий излучения, попадающих на приемные пластины, или радиационному балансу поверхности, над которой установлен датчик.

Тарировка балансомера производится по эталонному источнику света. При тарировке одна из приемных пластин закрывается чехлом. Обычно обе поверхности балансомера с ветровым экраном тарируют раздельно. Поэтому поглощение части радиации полиэтиленовой пленкой не сказывается на работе прибора. Балансомер изготавливается в двух вариантах, отличающихся размерами приемной площадки и чувствительностью. Для датчика с приемной площадкой 20×20 мм^2 чувствительность примерно равна $35 \frac{\text{мв}}{\text{кал/см}^2 \text{ мин.}}$ при внутреннем сопротивлении порядка 300 ом, для датчика с приемной площадкой 10×10 мм^2 — соответственно $8 \frac{\text{мв}}{\text{кал/см}^2 \text{ мин.}}$ и 100 ом.

При пользовании балансомером с любым индикатором напряжения чувствительность может быть уменьшена в необходимых пределах за счет применения шунта к датчику, сопротивление которого рассчитывается по формуле

$$r_{ш} = \frac{ur_{в}}{R\alpha - u}, \qquad \text{(III.24)}$$

здесь R — необходимый предел измерений в масштабе радиационного баланса, u — предел измерений по напряжению для имеющегося в наличии индикатора, $r_{в}$ — внутреннее сопротивление балансомера, α — чувствительность балансомера. Формула справедлива для индикатора компенсационного типа, работающего без отбора тока, либо в случае, когда сопротивление индикатора достаточно велико по сравнению с сопротивлением балансомера с шунтом.

Термоэлектрический балансомер конструкции АФИ выгодно отличается от распространенных вариантов этого прибора значительной механической прочностью и надежностью, высокой чувствительностью и значительным собственным сопротивлением датчика (что важно при дистанционных измерениях), независимостью показаний от ветра, большой автономностью установки датчика. Все это позволяет использовать балансомер АФИ в системах дистанционного сбора информации при удалении датчика от измерительного блока до 1000 м. Недостатком балансомера, как и других плоских приемников радиации, является зависимость показаний от угла падения излучения. Для балансомера АФИ активная зона лежит в пределах $\pm(75 \div 80°)$ от нормали.

Среди недостатков прибора наиболее существенны некоторые моменты, связанные с применением ветровой защиты. Это в первую очередь затенение чувствительного элемента каркасом и искажение спектра излучения при поглощении радиации пленкой. Пленку необходимо менять через каждые 4—5 недель работы, поскольку происходит старение и помутнение ее под действием солнечного излучения.

2. **Почвенный тепломер.** В нем также используется дифференциальная электролитическая термобатарея медь-константан, технология изготовления которой рассмотрена выше. Для тепломера заготовка термобатареи после нанесения меди заливается эпоксидной смолой и подвергается необходимой механической обработке.

При установке тепломера в среде, где будут измеряться потоки, при правильном выборе размеров датчика естественный тепловой режим среды не нарушится и через тепломер будет проходить такой же тепловой поток, какой существует в соответствующем сечении среды. При этом перепад температуры между рабочими поверхностями тепломера может быть измерен с помощью дифференциальной термобатареи.

Некоторая специфика конструкции тепломера связана с применением его в почве, где процессы тепло- и массообмена взаимосвязаны. В частности, весьма существенным представляется перенос

влаги непосредственно по капиллярной системе почвы и в виде пара. При установке тепломера нарушаются естественные процессы обмена влагой, что может привести к ошибкам в определении потоков тепла, особенно при наличии конденсации пара на одной из поверхностей тепломера. Для предупреждения этого пластина тепломера перфорирована и через отверстия происходит обмен влагой между слоями ниже и выше тепломера.

Тарировка тепломера производится на специальной установке. Нагреватель фиксированной мощности размещается между двумя тепломерами, и вырабатываемый тепловой поток распределяется между ними поровну. При тарировке блок тепломеров с нагревателем помещается в камеру спокойного воздуха и напряжение на входе тепломеров регистрируется при разных величинах подводимой мощности (регулируется напряжение питания нагревателя). Метрологически более точна процедура тарировки в стационарном режиме, требующая длительной выдержки блока в режиме нагрева. Учитывая, что обычно тепловой поток в почву составляет малую долю теплового баланса деятельной поверхности, нет необходимости в прецизионных измерениях этого параметра, а техническая точность порядка 5—7% обеспечивается при применении указанной методики.

Важными достоинствами почвенных тепломеров АФИ является их дешевизна и простота при достаточной механической прочности, надежности и высокой чувствительности $\left(\text{до } 50 \frac{\text{мв}}{\text{кал/см}^2 \text{ мин.}}\right)$. Внутреннее сопротивление почвенного тепломера достаточно велико (до 600 см) и обеспечивает проведение дистанционных измерений.

Согласование датчика с индикатором производится так же, как и для радиационного балансомера.

3. **Градиентомер температуры и влажности воздуха.** При использовании расчетных схем теплового баланса весьма важно уменьшить погрешности измерений таких исходных параметров, как градиенты температуры и влажности воздуха, для которых особенно велики погрешности стандартных методик.

Наиболее эффективным путем снижения погрешности и упрощения измерений является переход к прямым измерениям градиентов (без определения абсолютных значений).

Как известно, при определении влажности воздуха психрометрическим методом упругость паров воды e определяется по формуле

$$e = E(T^*) - Ap(T - T^*), \qquad \text{(III.25)}$$

где T — температура сухого термометра, T^* — температура смоченного термометра, A — психрометрический коэффициент, p — барометрическое давление, $E(T^*)$ — упругость паров воды, насыщающих пространство при температуре T^*.

При определении перепада влажности

$$e_1 - e_2 = E(T_1^*) - E(T_2^*) - Ap\left[(T_1 - T_2) - (T_1^* - T_2^*)\right], \qquad \text{(III.26)}$$

или

$$\Delta e \approx \frac{\partial E(T^*)}{\partial T} \Delta T^* - A p (\Delta T - \Delta T^*). \qquad \text{(III.27)}$$

Приведенную формулу удобно использовать для моделирования психрометрического уравнения при измерениях градиентов влажности. В другой форме

$$\Delta e \approx \left[\frac{\partial E(T^*)}{\partial T} + A p \right] \Delta T^* - A p \Delta T. \qquad \text{(III.28)}$$

Если использовать схемы прямого измерения перепадов температур по сухому и смоченному термометрам и чувствительность измерительных схем менять по заданному закону, можно осущест-

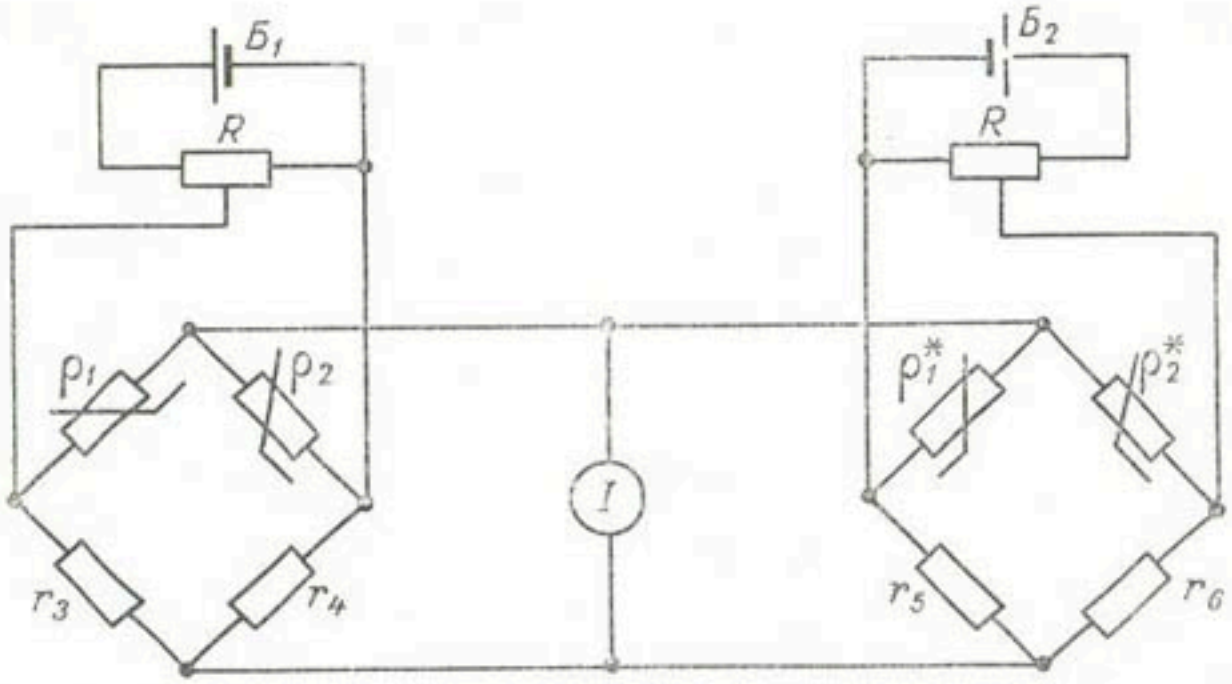


Рис. 47. Схема градиентомера температуры и влажности воздуха.

вить прямые измерения градиентов влажности воздуха. Подобный прибор создан в АФИ М. А. Кагановым.

Градиентомер температуры и влажности воздуха содержит два психрометрических аспирационных датчика, которые размещаются в поле на двух выбранных уровнях. В качестве чувствительных элементов в датчиках использованы полупроводниковые терморезисторы. Два сухих терморезистора обоих датчиков включаются в смежные плечи дифференциальной мостовой схемы. На два других терморезистора надеваются смачиваемые водой фитили, и они фиксируют температуры смоченных термометров обоих датчиков. Смоченные терморезисторы также включаются в схему дифференциального моста. Расчет дифференциальных мостов производится, исходя из необходимости получения линейной зависимости выходного тока от перепада температуры между сухими термометрами (или смоченными). Значения параметров мостовой схемы выбираются с учетом требуемой зависимости чувствительности схемы от температуры.

Для моста сухих термометров необходимо постоянство чувствительности во всем рабочем температурном диапазоне. Чувствительность моста смоченных термометров меняется по закону $\varphi(T^*) = \frac{\partial E(T^*)}{\partial T} + AP$, который может быть задан таблицами. При измерениях градиента влажности воздуха оба дифференциальных моста включаются навстречу на общий индикатор. При измерениях перепада температуры мост смоченных терморезисторов отключается. Этот принцип практически реализован в градиентомере температуры и влажности воздуха, входящем в комплект датчиков теплового баланса АФИ, схема которого приведена на рис. 47.

§ 5. Специализированные установки для расчета элементов теплового баланса

В связи с трудоемкостью обработки материалов и вычисления элементов теплового баланса большой интерес проявляется к специализированным вычислителям, позволяющим оперативно вычислять необходимые параметры. В данном разделе будут рассмотрены устройства, в которых используется расчетная схема метода теплового баланса.

Описанная ниже аппаратура разрабатывалась в Агрофизическом институте в 1958—1968 гг. и предназначалась для работы вместе с комплектом датчиков теплового баланса, рассмотренным ранее.

В изготовленных вариантах установок вычислитель работал с одним комплектом датчиков, хотя принципиальных препятствий для работы одного вычислителя с несколькими группами датчиков нет. Некоторые возможности такого применения специализированных вычислительных устройств рассмотрены далее.

В качестве датчиков исходных параметров применяются термоэлектрический радиационный балансомер, термоэлектрический почвенный тепломер, градиентомер температуры и влажности воздуха с полупроводниковыми чувствительными элементами, а также некоторые специальные датчики (например, градиентный газоанализатор). Учитывая особенности функциональных схем конкретных вычислителей, в основной вариант комплекта датчиков теплового баланса можно вносить некоторые коррективы.

Первым специальным вычислительным устройством был разработанный в 1958—1961 гг. Ю. Л. Розенштоком электромеханический теплобалансограф [24]. Блок-схема прибора приведена на рис. 48. В теплобалансографе применено временное разделение каналов измерений и вычислений.

Медленно меняющееся постоянное напряжение (± 5 мв) с датчиков через коммутатор подается к схеме измерения напряжения потенциометра ЭПП-09, с помощью которой осуществляется трансформация сигнала (преобразование напряжения в угол поворота).

Одновременно регистрирующее устройство потенциометра записывает измеренное значение входного параметра. В качестве коммутатора K_1 использована половина переключателя самого потенциометра ЭПП-09.

Преобразованный входной сигнал (угол поворота) передается на элемент памяти (реохорд), на котором устанавливается величина сопротивления, пропорциональная измеряемому значению параметра. Коммутация элементов памяти осуществляется электромагнитными муфтами, производящими необходимые переключения кинематической схемы вычислительного блока (коммутатор K_2).

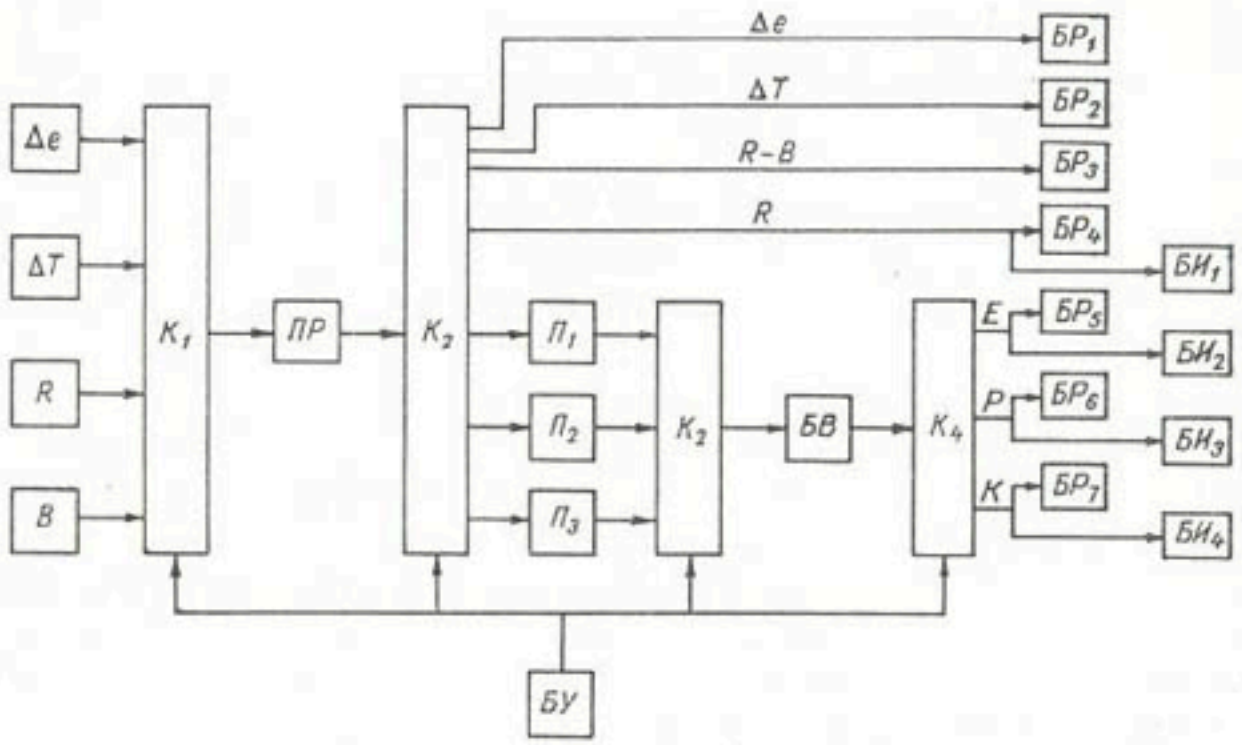


Рис. 48. Блок-схема теплобалансографа Ю. Л. Розенштока.

K_1, K_2, K_3, K_4 — коммутаторы, *ПР* — преобразователь, $П_1$, $П_2$, $П_3$ — элементы памяти, *БВ* — блок вычислений, *БР* — блок регистрации, *БИ* — блок интегрирования.

Для моделирования операций вычисления параметров теплового баланса использован принцип уравновешенного моста. Как известно, в состоянии равновесия мостовой схемы величина регулируемого сопротивления

$$r_{\text{вых}} = \frac{r_1}{r_2} r_3, \qquad \text{(III.29)}$$

где r_1, r_2, r_3 — сопротивления остальных плеч моста.

Релейный коммутатор K_3 формирует из реохордов блока памяти и вычислений мостовую схему, в которую в качестве регулируемого элемента включается реохорд потенциометра. В блоке памяти предусмотрен суммирующий реохорд, осуществляющий операцию $\Delta e + a\Delta T$.

В качестве вычислительного блока *БВ* использована часть электронной схемы потенциометра, осуществляющая уравновешивание собранной мостовой схемы. Коммутатор K_3, управляемый

сигналами от *БУ*, обеспечивает последовательное осуществление всех вычислительных операций.

Одновременно с операциями вычислений производится регистрация рассчитанных значений потоков на диаграммной ленте самописца. Кроме того, электромеханический коммутатор K_4 в моменты отработки рабочих формул поочередно подключает к системе выходные интеграторы, на накопительных счетчиках которых суммируются потоки. Помимо вычисленных потоков P и E, интегратор суммирует входные сигналы радиационного баланса и разности $R - B$.

Блок управления теплобалансографа содержит программирующие элементы, логическую схему анализатора полярности сигналов и релейный блок. Программа работы задается переключателем электронного потенциометра, половина которого использована для управления релейным блоком, непосредственно осуществляющим необходимые переключения в схеме потенциометра и вычислительной приставке. При этом реле используются как для коммутации элементов электронных схем, так и для включения управляющих двигателей и электромагнитных муфт, посредством которых соединяются элементы кинематической схемы прибора.

Все элементы, и измеряемые, и вычисленные [за исключением коэффициента обмена K, см. формулу (III.14)], могут менять знак в процессе суточного цикла изменений. Промежуточное преобразование сигнала и реализация вычислений с помощью мостовой схемы не обеспечивают получения биполярных сигналов. Логическая схема анализатора полярности управляет переключением соответствующих выходных элементов и позволяет регистрировать и интегрировать потоки с учетом фактического знака. В качестве индикаторов знака в анализаторе полярности использованы чувствительные поляризованные реле, реализующие операции управления логической схемой.

Теплобалансограф изготавливается на базе электронного самопишущего потенциометра ЭПП-09. Измерительные и вычислительные блоки монтируются внутри корпуса самописца. Мостовые схемы датчиков и релейные элементы блока управления и анализатора знака размещаются на специальных платах на задней стенке прибора. Моторы, управляющие муфты, реохорды блока памяти и необходимые элементы кинематических схем монтируются на двух панелях, прикрепляемых к подвижному каркасу, на котором размещена кинематическая схема самого потенциометра. В последних вариантах конструкции на этом же каркасе размещались и элементы схемы интегратора.

Помимо основного блока, в комплект теплобалансографа входит также блок питания, обеспечивающий подачу необходимых напряжений на элементы установки (психрометры градиентной схемы, реле и электромагнитные муфты и т. д.).

Применение теплобалансографа позволяет существенно уменьшить трудоемкость наблюдений теплового баланса и получать опе-

ративную информацию как о суммах, так и о мгновенных значениях потоков тепла.

Выше уже отмечалось, что применяемые датчики дают возможность существенно удалять места установки датчиков от измерительного павильона (до 1000 м) и обеспечивают практически любые варианты использования теплобалансографа при полевых экспериментах.

Однако наличие в схеме прибора электромеханических элементов требует не только весьма тщательного изготовления аппаратуры, но и достаточно высококвалифицированного обслуживающего персонала. Фактическая надежность вычислительных блоков недостаточна, что связано с некоторым несовершенством схемы, а также с погрешностями, допущенными в процессе изготовления аппаратуры.

Принципиальный недостаток первой модели теплобалансографа АФИ связан с принятым временным разделением каналов измерений и вычислений. Измеряемые параметры сильно коррелированы, а введение временного разделения вносит дополнительные погрешности в вычисленные мгновенные значения потоков и ограничивает возможности получения достоверной информации за малые интервалы времени. По данным исследований, суммы потоков за сутки могут быть определены с точностью порядка 10%. Для пятидневных сумм погрешность снижается до 5%. Существенные погрешности возникают в критических условиях, когда значения измеренных параметров очень малы (этот вопрос более подробно рассматривается в разделе, посвященном репрезентативности измерений).

Основные указанные недостатки ликвидированы в электронном варианте теплобалансографа — установке «Поток» [18]. Эта установка разрабатывалась Агрофизическим институтом совместно с кафедрой вычислительных устройств Ленинградского электротехнического института им. В. И. Ульянова (Ленина). Работа над ней завершена в 1968 г.

Специализированное вычислительное устройство для агрофизических исследований — установка «Поток» — предназначена для синхронного измерения, вычисления, суммирования и регистрации элементов теплового баланса, водного баланса сельскохозяйственного поля, а также некоторых агроклиматических показателей, связанных с тепло- и массообменом растительного покрова сельскохозяйственного поля. Эта установка осуществляет непрерывное измерение перепадов температуры и влажности воздуха, а также перепад концентрации углекислоты в приземном слое атмосферы. Помимо этого, она измеряет радиационный баланс и тепловой поток в почву. Установка вычисляет коэффициент турбулентного обмена и коэффициент влагообеспеченности по расчетным формулам метода теплового баланса; кроме того, она вычисляет мгновенные значения и суммы (нарастающим итогом) радиационного баланса, потока тепла в почву, турбулентного потока тепла, суммарного испарения и потока углекислого газа. Все параметры

рассчитываются в нескольких каналах параллельной обработки данных синхронно с измерением.

Установка «Поток» имеет пять основных функциональных блоков: блок датчиков, блок усилителей, вычислительное устройство, интегратор, регистратор.

Блок датчиков содержит комплект датчиков теплового баланса. В состав комплекта входят градиентомер температуры и влажности воздуха в приземном слое, радиационный балансомер, почвенный тепломер. Для использования в установке «Поток» выпускаемая аппаратура была несколько модифицирована. Комплект датчиков «Потока» имеет два почвенных тепломера, один из которых применяется для моделирования соотношения $(R-B)$, а второй — для регистрации и суммирования самого потока в почву. Схема моделирования величины $(R-B)$ допускает раздельную регистрацию и суммирование величины радиационного баланса.

В модифицированном варианте градиентомер температуры и влажности воздуха вырабатывает сигналы, пропорциональные значениям параметров ΔT и $\varphi(T^*)\Delta T^*$. В отличие от обычных градиентомеров, сигнал $\Delta e=\varphi(T^*)\Delta T^*-Ap\Delta T$ вырабатывается в вычислительном устройстве установки. Это позволяет уменьшить погрешность за счет исключения повторного суммирования в процессе вычисления потоков (на первом этапе при моделировании Δe, а на втором — при вычислении знаменателя расчетных формул $\Delta e+0{,}64\Delta T$). Сигнал градиента концентрации CO_2 подается от специального градиентного газоанализатора, разработанного в АФИ (этот прибор рассматривается ниже).

Все датчики установки вырабатывают медленно меняющиеся постоянные напряжения любого знака, унифицированные по уровню (10 мв). Так как измерения и вычисления осуществляются синхронно, для работы установки важны инерционные характеристики чувствительных элементов.

Фактические постоянные времени датчиков различны и лежат в пределах 15—60 сек. Сигнал, получаемый с датчиков, содержит высокочастотные составляющие, которые могут рассматриваться как помеха и подавляться в процессе обработки сигнала. Максимальная частота полезной составляющей сигнала принята равной 0,001 гц.

Установка «Поток» при эксплуатации работает при температуре среды 0—40° С и относительной влажности воздуха до 90%. Непрерывная работа между профилактическими осмотрами 250 часов. Межремонтный период 4 месяца.

Функциональная схема установки приведена на рис. 49. Блок усиления (*БУ*) состоит из шести операционных усилителей, обеспечивающих усиление входных сигналов, необходимое для дальнейшей обработки. Введение инерционного звена во входные цепи дает возможность выравнивать инерции датчиков.

Блок вычисления (*БВ*) реализует операции суммирования, умножения и деления, необходимые для моделирования рабочих фор-

мул определения потоков. Величина $\Delta e \approx \varphi(T^*)\Delta T^* - Ap\Delta T$, необходимая для вычислений испарения и коэффициента влагообеспеченности, вырабатывается суммирующим усилителем. Далее двумя схемами деления моделируются зависимости $K = m\dfrac{R-B}{\varphi(T^*)\Delta T^*}$ и

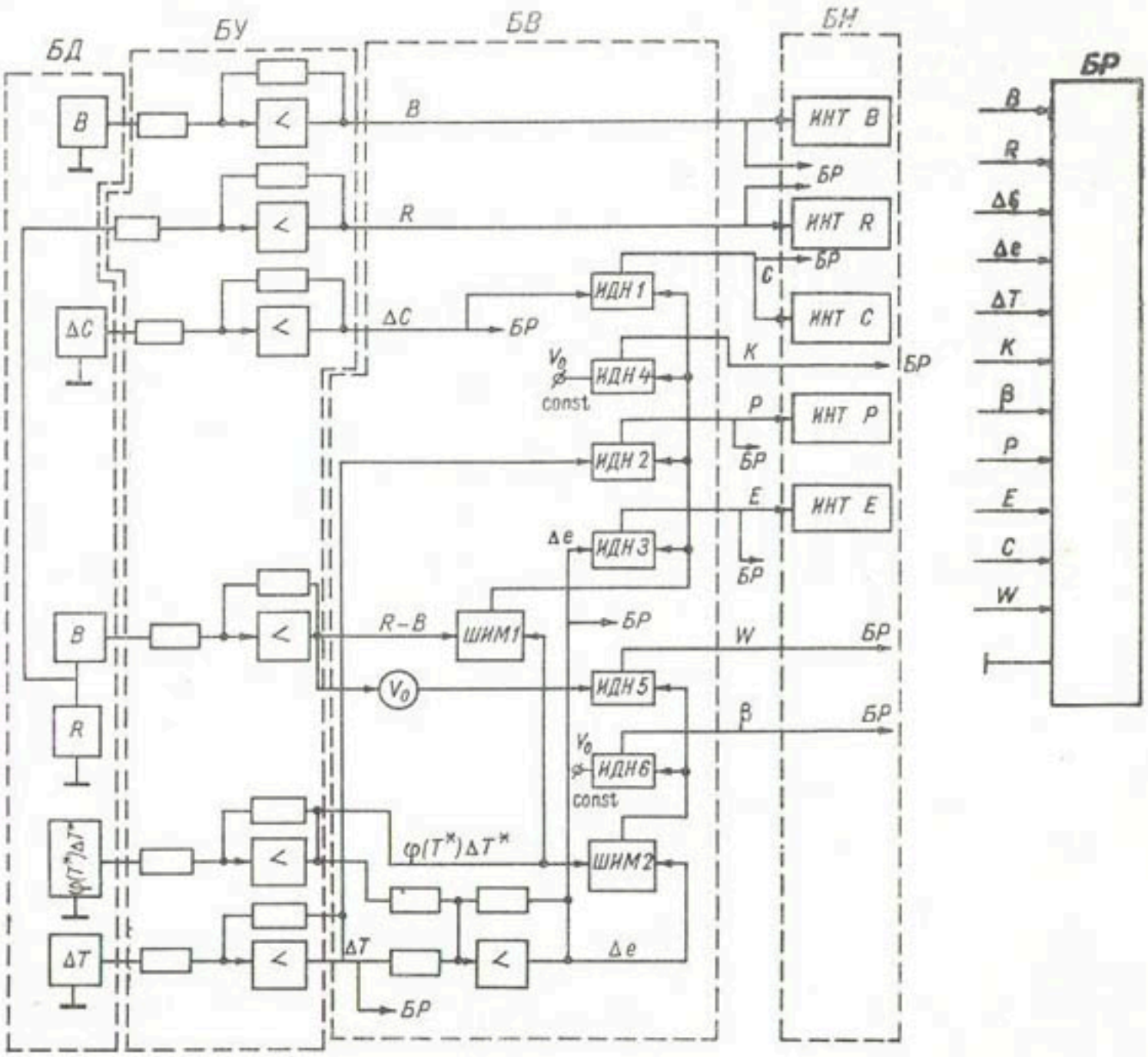


Рис. 49. Функциональная схема установки «Поток».

БД — блок датчиков, *БУ* — блок усиления, *БВ* — блок вычисления, *БИ* — блок интегрирования, *БР* — блок регистрации.

$\beta = \dfrac{\Delta e}{\varphi(T^*)\Delta T^*}$, а затем на схемах умножения вычисляются значения потоков $LE = K\Delta e$; $P = K\Delta T$; $C = K\Delta C$ и значение влажности почвы, рассчитываемое по формуле $W = \beta[D + F(R - B)]$, предложенной М. Г. Санояном. Эта формула получена на основе анализа соотношения между коэффициентом влагообеспеченности и влажностью почвы для районов, где допустимо предположение о равенстве испаряемости и величины $R - B$.

Все измеренные величины (после усиления), а также рассчитанные параметры регистрируются. Возможна синхронная регистрация по всем каналам либо временное разделение каналов регистрации на одном многоточечном приборе. При этом шаг опроса может задаваться произвольно в пределах возможностей регистратора, в качестве которого используется электронный потенциометр ПС-1.

Помимо этого, суммируются значения потоков в пределах выбранных промежутков времени. Эта операция выполняется пятиканальным блоком интегрирования (*БИ*), выходными элементами которого являются механические накопительные счетчики с приводом от реверсивных двигателей.

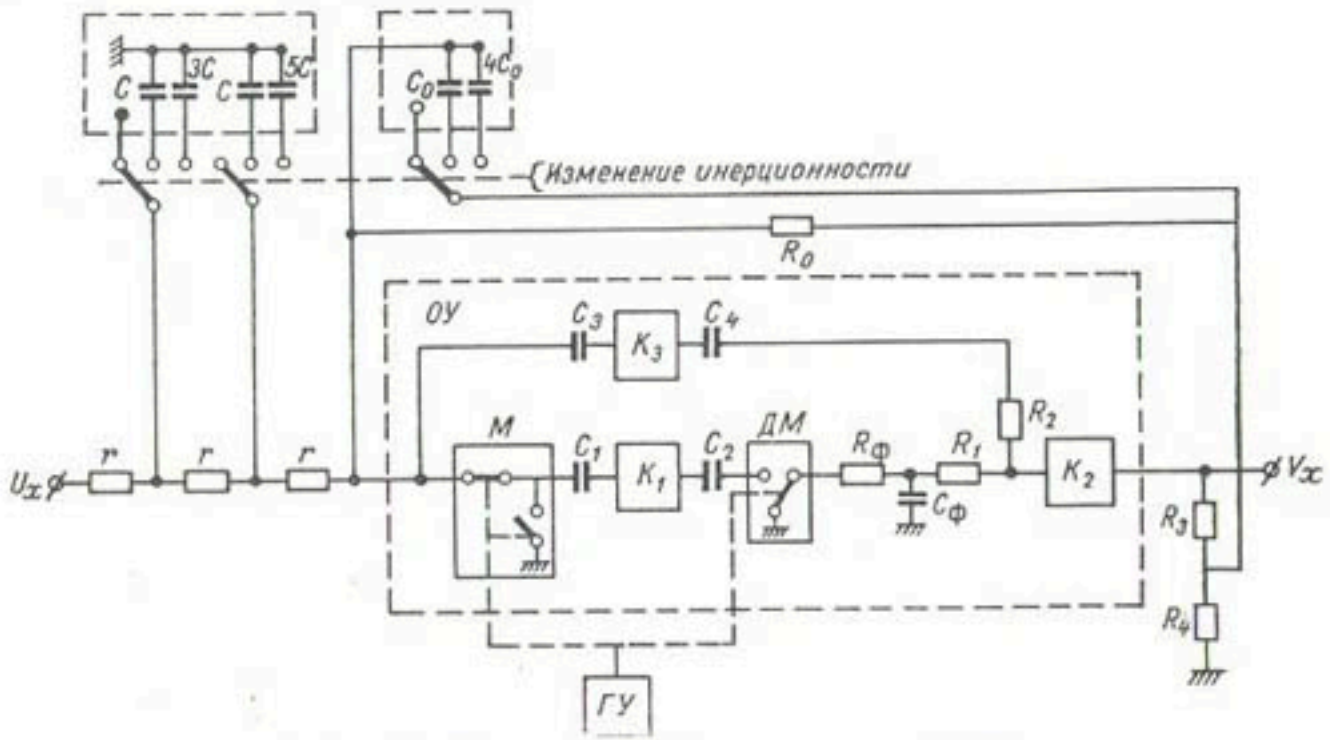


Рис. 50. Операционный усилитель (*ОУ*).

М — модулятор, *ДМ* — демодулятор, K_1 — усилитель переменного тока, K_2 — усилитель постоянного тока, K_3 — форсирующий каскад, *ГУ* — генератор управления.

Остановимся несколько подробнее на некоторых основных элементах установки. Операционные усилители, используемые во всех блоках установки, в том числе и входные усилители, выполнены на базе единого типового усилителя постоянного тока (рис. 50). Этот усилитель построен по обычной функциональной схеме с модулятором и демодулятором, форсирующим каскадом и выходным усилителем постоянного тока. Выходные сигналы с демодулятора и форсирующего каскада поступают в выходной усилитель постоянного тока с эмиттерным повторителем на выходе для снижения выходного сопротивления всего операционного усилителя в целом. Сам усилитель постоянного тока имеет коэффициент усиления порядка 10 000 при входном сопротивлении около 20 ком.

Для управления тремя операционными усилителями используется один генератор прямоугольного напряжения, подаваемого на модуляторы и демодуляторы.

Благодаря применению реактивных элементов в цепях обратной связи входных усилителей осуществляется коррекция частот-

ных характеристик. Для них коэффициент усиления в полосе частот 0—0,01 гц равен примерно 500. Высокочастотные составляющие подавляются.

Множительно-делительные устройства выполнены по компенсационной схеме. Основным элементом делительного устройства является широтно-импульсный модулятор (*ШИМ*), состоящий (рис. 51) из триггера Шмидта, усилителя постоянного тока и импульсного делителя напряжения. *ШИМ* вырабатывает прямоуголь-

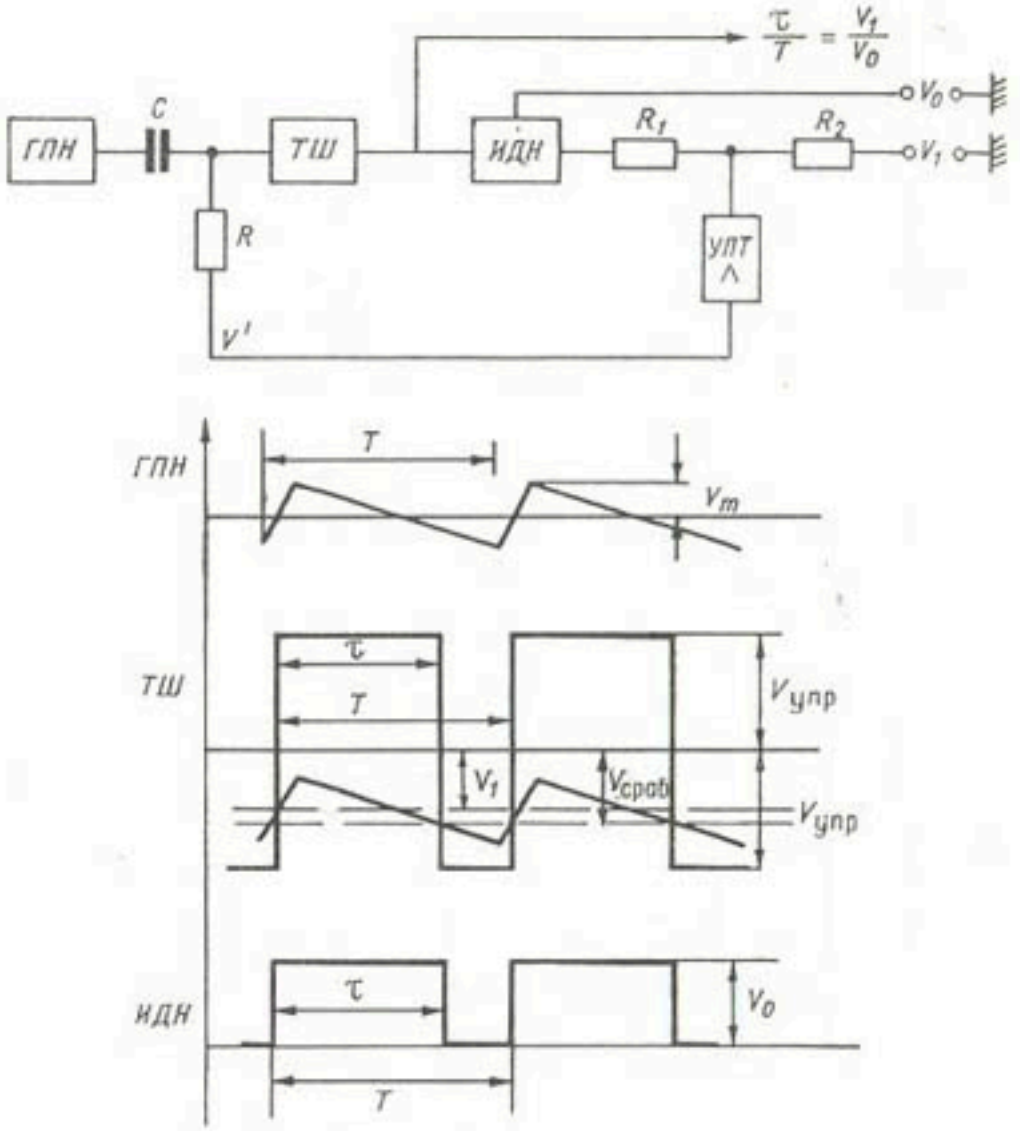


Рис. 51. Блок-схема широтно-импульсного модулятора (*ШИМ*).

ГПН — генератор пилообразного напряжения, *ТШ* — триггер Шмитта, *ИДН* — импульсный делитель напряжения, *УПТ* — усилитель постоянного тока.

ное импульсное напряжение с относительной длительностью $\theta = \tau/T_{\text{п}}$, пропорциональной величине β или K; $T_{\text{п}}$ — период следования импульсов, τ — длительность импульса. Формирователь *ШИМ* работает на группу импульсных делителей напряжения (*ИДН*), реализующих операцию умножения временного интервала θ на напряжение постоянного тока U_x. При подаче на вход импульсного делителя напряжения (рис. 52) соответствующих сигналов с входных усилителей и управляющего сигнала *ШИМ* напряжения на выходах группы *ИДН* пропорциональны значениям потоков и влажности почвы. При этом на входы *ИДН*, отрабатывающих для

регистрации значения β и K, подаются постоянные напряжения, задающие масштаб параметров, подлежащих оценке.

Множительно-делительные устройства обеспечивают выполнение необходимых операций для любых сочетаний знаков входных параметров. Максимальная относительная погрешность работы

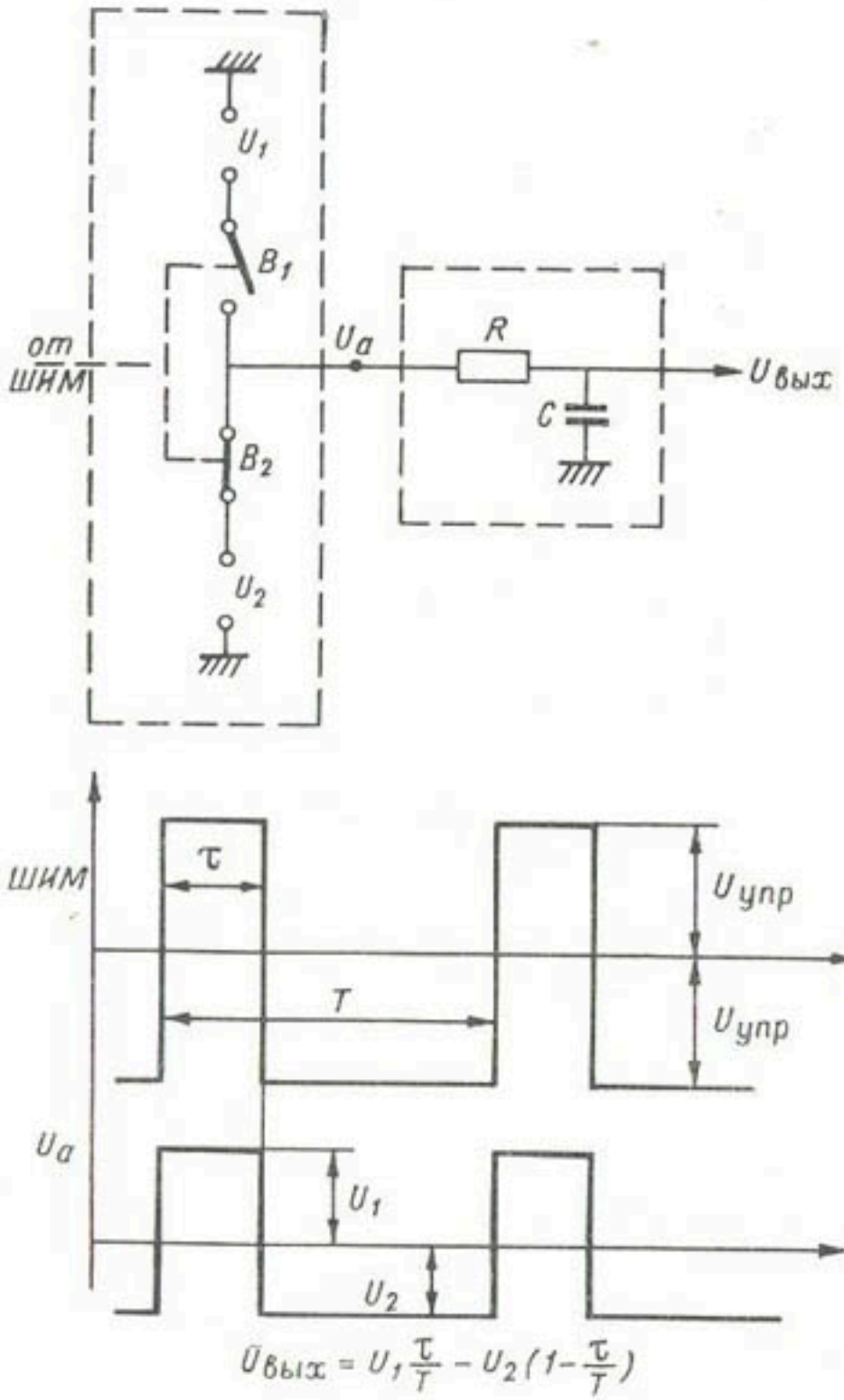


Рис. 52. Схема импульсного делителя напряжения (*ИДН*).

множительно-делительного устройства не превышает 3% в заданном диапазоне внешних условий.

Интегрирование необходимых параметров осуществляется с промежуточным преобразованием напряжения во временно́й интервал. В состав интегратора входит распределитель импульсов стабильной частоты, стабилизированный кварцевым генератором и вырабатывающий необходимую последовательность импульсов синхро-

низации. Для обеспечения интегрирования в пределах больших промежутков времени использованы механические накопители, управляемые реверсивными шаговыми двигателями. Специальная схема управления шаговым двигателем обеспечивает необходимую надежность работы интегратора.

Преобразование напряжения во временной интервал осуществляется схемой сравнения, на один из входов которой подается напряжение от генератора линейно меняющегося напряжения. На второй вход схемы сравнения подаются интегрируемые напряжения.

Генератор линейно меняющегося напряжения представляет собой восьмиразрядный декодирующий преобразователь, вырабатывающий ступенчатое пилообразное напряжение частотой 30 гц.

Формирование угла поворота реверсивного шагового двигателя, пропорционального интегрируемой величине, осуществляется следующим образом. До момента равенства пилообразного напряжения и измеряемой величины импульсы от распределителя поступают на суммирующий вход шагового двигателя. Начиная с момента равенства напряжений и далее (когда пилообразное напряжение больше сигнала) логическая схема направляет импульсы от распределителя на вычитающий вход двигателя. Таким образом, результирующий угол поворота реверсивного шагового двигателя пропорционален входному сигналу с учетом его знака.

Необходимость аппаратуры достаточной надежности, способной работать в длительных циклах измерений (необходимый максимальный интервал интегрирования определен в 10 суток), обусловила выбор цифроаналогового интегратора с электромеханическим выходным устройством. В таких условиях чисто электронные накопители более сложны и менее надежны, чем электромеханические, так как допускают сбои при отключении питания и других помехах, которые нельзя исключить при использовании аппаратуры в полевых условиях.

Кроме основных функциональных блоков, установка «Поток» содержит блок питания, обеспечивающий подачу необходимых напряжений к датчикам и элементам вычислительного устройства. Блок датчиков выполняется на базе измерительного устройства градиентомера температуры и влажности воздуха. Усилительный вычислительный и интегрирующий блоки изготавливаются по субблочной системе на основе типового десятикассетного корпуса.

Помимо монтажных схем, блоки различаются лицевыми панелями, на которые выведены органы контроля режима и настройки, различные для каждого из блоков. Выходные элементы интегратора конструктивно вынесены в блок питания для облегчения сильноточного питания шаговых двигателей. Блок питания содержит, помимо шаговых двигателей с выходными счетчиками, трансформаторную панель и серию субблоков с узлами выпрямительных схем.

Субблочная конструкция позволяет значительно повысить надежность работы установки за счет холодного резервирования

кассет в составе запасного комплекта. Замена дефектных элементов в процессе эксплуатации обеспечивает бесперебойную работу устройства в течение всего сезона полевых наблюдений.

§ 6. Пульсационный метод измерения испарения

Расчетные схемы методов теплового баланса и турбулентной диффузии базируются на предположении равенства коэффициентов турбулентного обмена для тепла и пара, сформулированном в соотношении Боуэна. Возможные неточности и ограничения условий применимости этих методов еще не исследованы с достаточной полнотой. В связи с этим в последние годы большое внимание уделяется разработке новых методов определения элементов баланса энергии и вещества в приземном слое атмосферы.

Одним из наиболее перспективных представляется пульсационный метод определения потоков тепла и влаги. Поскольку основную роль в процессах переноса в приземном слое воздуха играют турбулентные явления, естественно стремление измерять непосредственно вертикальные турбулентные потоки над исследуемой поверхностью. Если эта поверхность однородна, так что горизонтальный перенос над ней достаточно мал, то вертикальный турбулентный поток будет в этом случае полностью характеризовать перенос тепла или вещества от деятельной поверхности в атмосферу.

Далее мы будем рассматривать пульсационный метод применительно к определению потока водяного пара в приземной атмосфере или суммарного испарения деятельной поверхности растительного покрова.

Вывод основных соотношений пульсационных методов может быть иллюстрирован схемой баланса пара в приземной атмосфере (см. рис. 42). В § 1 данной главы эта схема рассматривалась достаточно подробно, причем в записанных соотношениях подставлены мгновенные значения параметров ветра и влагосодержания воздуха. В условиях турбулентной атмосферы мгновенные значения параметров представляют собой случайные функции координат и времени.

Пульсационный метод основан на предположении о возможности представления случайных функций, описывающих вертикальную скорость потока w и влажность q, в виде суммы пульсаций и среднего значения:

$$w = \overline{w} + w', \tag{III.30}$$

$$q = \overline{q} + q', \tag{III.31}$$

где w и $\overline{q}$ — средние значения, w' и q' — пульсации. При этом, очевидно, пульсации центрированы, т. е. их среднее значение равно нулю:

$$\left.\begin{aligned} \overline{w'} &= 0 \\ \overline{q'} &= 0 \end{aligned}\right\}. \tag{III.32}$$

Пока речь идет о статистическом осреднении, законность такого подхода не вызывает сомнений. При переходе к средним значениям за ограниченный интервал времени вследствие непрерывности спектров метеоэлементов, условия (III.30) и (III.31), строго говоря, не выполняются. Однако может быть выбран такой интервал осреднения, для которого эти условия реализуются с достаточной точностью. Величина его обычно лежит в пределах 4—20 минут. Как отмечалось выше, за малый интервал времени dt через единичную площадку в вертикальном направлении переносится количество влаги, равное

$$dA_z = \rho w(t)\, q(t)\, dt, \tag{III.33}$$

а в течение интервала осреднения τ_0

$$A_z = \int_0^{\tau_0} \rho w(t)\, q(t)\, dt. \tag{III.34}$$

Отсюда с учетом (III.30) и (III.31) получим

$$A_z = \int_0^{\tau_0} \rho \overline{w}\,\overline{q}\, dt + \int_0^{\tau_0} \rho \overline{w} q'(t)\, dt + \int_0^{\tau_0} \rho w'(t)\, \overline{q}\, dt + \int_0^{\tau_0} \rho w'(t)\, q'(t)\, dt. \tag{III.35}$$

При правильном выборе интервала осреднения для временных средних соблюдается условие (III.32), а значения $\overline{w}$ и $\overline{q}$ в пределах этого интервала не зависят от времени. В этом случае второй и третий интегралы в (III.35) оказываются равными нулю, а $\overline{w}$ и $\overline{q}$ выносятся за знак первого интеграла. Поэтому

$$A_z = \rho \overline{w}\,\overline{q}\tau_0 + \int_0^{\tau_0} \rho w'(t)\, q'(t)\, dt. \tag{III.36}$$

Перейдем теперь к величине турбулентного потока влаги E; мы имеем:

$$E = \frac{A_z}{\tau_0} = \rho \overline{w}\,\overline{q} + \frac{1}{\tau_0} \int_0^{\tau_0} \rho w'(t)\, q'(t)\, dt. \tag{III.37}$$

Над однородной площадкой средняя вертикальная скорость потока равна нулю. Поэтому

$$E = \frac{1}{\tau_0} \int_0^{\tau_0} \rho w'(t)\, q'(t)\, dt. \tag{III.38}$$

Для определения турбулентного потока влаги E необходимо измерять пульсации вертикальной скорости потока воздуха и

абсолютной влажности, а также располагать устройством, реализующим вычисление E по формуле (III.38).

В последние два десятилетия появился ряд работ, посвященных исследованию пульсаций метеоэлементов и потоков тепла и влаги. Эти работы позволяют сформулировать основные требования к датчикам пульсаций, выявить возможности и преимущества пульсационного метода.

Как известно, распределение энергии по спектру турбулентных пульсаций в атмосфере зависит от высоты над деятельной поверхностью: с ростом высоты максимум энергии сдвигается в сторону низких частот. При определении турбулентных потоков датчики пульсаций должны воспроизводить все составляющие спектра, вносящие весомый вклад в общую энергию. По этой причине инерционность датчиков определяет минимальную допустимую высоту их установки. Так, для высоты установки датчиков порядка 1 м необходимо, чтобы они воспроизводили пульсации в диапазоне частот от сотых долей герца до 20—30 гц. Более инерционные датчики для получения точного значения испарения должны устанавливаться на большей высоте. С другой стороны, чем больше высота установки датчиков, тем на большей площади должно выполняться условие горизонтальной однородности.

Что касается самих датчиков, то, наряду с малой инерционностью, они должны обладать малыми линейными размерами, чтобы приблизиться к измерениям значений метеоэлементов «в точке». Достаточно жесткие требования предъявляются и к чувствительности пульсационных измерителей, так как обычно пульсации метеопараметров по величине составляют не более 15—20% средних значений и должны измеряться с точностью порядка 5%.

Перечисленные требования определяют серьезные трудности, с которыми приходится сталкиваться при разработке аппаратуры для пульсационных измерений. Наиболее распространенные датчики метеопараметров, как правило, не удовлетворяют этим требованиям и оказываются непригодными для использования в подобной аппаратуре.

§ 7. Аппаратура для определения испарения пульсационным методом

Первая практическая проверка теоретических обоснований пульсационного метода определения испарения была проведена с помощью комплекта датчиков, разработанного Р. Тейлором и А. Дайером в 1956—1957 гг.

Вторая, усовершенствованная модель этого прибора, названная «Эвапотрон», была разработана Дж. Махером в 1962 г. [45]. В этой установке датчиком пульсаций влажности служит электропсихрометр, в котором для измерений температуры в качестве сухого и смоченного термометров использованы терморезисторы

из никелевой микропроволоки. Инерционность таких датчиков составляет 0,2—0,4 сек. Для измерения вертикальной составляющей скорости ветра в «Эвапотроне» использован проволочный термоанемометр. Достаточно сложные системы коррекции нелинейностей обеспечивают в нем пропорциональность выходных сигналов датчиков величинам пульсаций w' и q'. Для перемножения и интегрирования в приборе использован измерительный механизм от электросчетчика. Сравнительно большая инерционность применяемых в «Эвапотроне» чувствительных элементов приводит к необходимости установки датчиков на высоте около 4 м над уровнем деятельной поверхности.

В последующих моделях аналогичных приборов для измерения вертикальной скорости делались попытки использования ультразвуковых анемометров, обладающих весьма малой инерционностью и высокой точностью.

Наибольшие трудности при реализации пульсационного метода связаны с измерением пульсаций влажности. Большинство известных влагомеров для воздуха и газов измеряют величину парциального давления водяных паров или относительную влажность, для перехода же к удельной влажности требуются довольно сложные моделирующие схемы. Лабораторные приборы для измерения удельной влажности, как правило, непригодны для полевых условий и не удовлетворяют требованию воспроизведения широкого частотного спектра пульсаций. Поэтому большинство попыток использования известных влагомеров в комплексах для пульсационных измерений не дает положительного эффекта.

Интересные результаты, касающиеся турбулентных потоков, получены в Институте физики атмосферы АН СССР. Здесь для измерения пульсаций влажности применен разработанный Л. Г. Елагиной оптический прибор, в котором используется зависимость поглощения инфракрасного излучения в воздухе от влагосодержания.

В Агрофизическом институте ведутся исследования и разрабатывается комплекс аппаратуры для измерения испарения, состоящий из емкостного пульсационного гигрометра (датчика пульсаций влажности), ультразвукового анемометра (измеряющего вертикальную скорость потока), а также прибора, предназначенного для обработки информации [43].

Пульсационный гигрометр

Из известных гигрометров принципиально наименьшей инерционностью обладают рефрактометрические приборы [46], использующие зависимость от абсолютной влажности показателя преломления влажного воздуха в диапазоне радиочастот:

$$n \approx 1 + 7{,}76 \cdot 10^{-5} p/T + 1{,}72 \cdot 10^{-3} q/T, \qquad \text{(III.39)}$$

где n — показатель преломления, p — атмосферное давление в миллибарах, q — абсолютная влажность, г/м^3, T — абсолютная температура в градусах Кельвина.

Для измерений наиболее удобно использовать зависимость диэлектрической постоянной воздуха ε от влажности

$$\varepsilon = n^2, \qquad \text{(III.40)}$$

где $n = f(q)$ — коэффициент преломления, и определять ε по емкости воздушного конденсатора.

В разработанном устройстве чувствительным элементом является конденсатор, состоящий из семи стержней, расположенных по образующей цилиндра, что обеспечивает высокую проницаемость

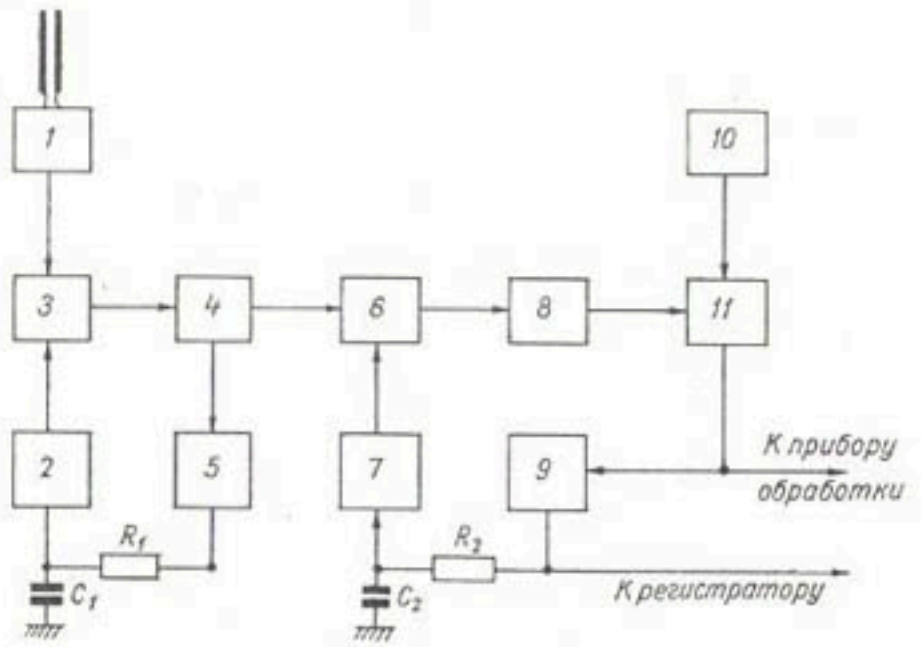


Рис. 53. Блок-схема пульсационного гигрометра.

1 — измерительный генератор, *2* — опорный генератор, *3* — смеситель, *4* — усилитель, *5* — частотный дискриминатор, *6* — смеситель, *7* — гетеродин, *8* — усилитель, *9* — частотомер, *10* — кварцевый генератор, *11* — детектор биений.

его для воздушных потоков. Конденсатор входит в схему измерительного генератора *1*, работающего на частоте около 120 Мгц (рис. 53).

На смеситель *3* поступают сигналы с выхода измерительного генератора *1* и опорного генератора *2*. Кроме быстрых изменений частоты измерительного генератора, связанных практически только с пульсациями влажности и температуры воздуха, проходящего через измерительный конденсатор, всегда существует и медленный уход (дрейф) частоты, вызванный изменением средней влажности воздуха, температурной и временной нестабильностью самого генератора, а также осаждением пыли и влаги на поверхности измерительного конденсатора. Все медленные изменения частоты при пульсационных измерениях не должны регистрироваться, поэтому в схеме гигрометра предусмотрена двухконтурная система автоматической подстройки частоты (АПЧ), отрабатывающая все медленные уходы частоты измерительного генератора. На выходе смеси-

теля *3* выделяется первая промежуточная частота, равная разности генераторов *1* и *2*, которая поступает на вход смесителя *6* и на частотный дискриминатор *5* первого контура АПЧ. Сигнал с выхода дискриминатора *5*, пропорциональный отклонению разности частот генераторов *1* и *2* от номинального значения первой промежуточной частоты, сглаживается фильтром R_1C_1 с большой постоянной времени и управляет частотой опорного генератора *2*, отрабатывая рассогласование частот генераторов *1* и *2*.

На вход второго смесителя *6*, кроме сигнала с выхода смесителя *3*, поступает напряжение от гетеродина *7*. Разностная частота (вторая промежуточная частота) с выхода смесителя *6* усиливается и подается на детектор биений *9*. На втором его входе действует сигнал от кварцевого генератора *10*. Выходной сигнал детектора биений после формирования выдается в виде последовательности импульсов на вход прибора обработки информации. Кроме того, та же последовательность импульсов поступает на частотомер *11*, преобразующий модуляцию по частоте повторения в амплитудную модуляцию. Напряжение с выхода частотомера поступает на выход прибора для записи с помощью шлейфного осциллографа и, помимо того, используется во втором контуре АПЧ, для чего это напряжение после сглаживания фильтром R_2C_2 подается на элемент, управляющий частотой гетеродина *7*.

Частотные соотношения в схеме прибора таковы, что при номинальной частоте измерительного генератора на выходе детектора частота биений равна 1,5 кгц. Для любых значений пульсаций влажности в пределах ± 3 г/м^3 не происходит перехода частоты биений через нуль и не возникает неоднозначность отсчета.

Расчеты чувствительности прибора по формуле (III.31) приводят при выбранной рабочей частоте измерительного генератора к следующему выражению для выходной частоты гигрометра:

$$\Delta f_{\text{вых}} \approx 500q' - 120T' + 20p', \qquad \text{(III.41)}$$

здесь q' и T' — пульсации абсолютной влажности (г/м^3), температуры (°К) и атмосферного давления p' (мб).

Из (III.41) видно, что в выходном сигнале пульсационного гигрометра присутствует компонента, зависящая от температуры, которая достаточно велика и которую необходимо учитывать при определении испарения; составляющая, связанная с пульсациями атмосферного давления, пренебрежимо мала.

Для разработанной модели пульсационного гигрометра диапазон измерений ± 3 г/м^3, частотный диапазон 0,01—40 гц.

Ультразвуковой анемометр

Прибор разработан применительно к измерениям вертикальной составляющей скорости ветра.

Основными достоинствами ультразвуковых приборов является малая инерционность и линейная зависимость показаний от

скорости ветра. Для анемометров, выполненных по дифференциальной схеме, разность времен распространения ультразвуковой волны от излучателей к приемникам $\Delta\tau$ зависит от скорости ветра следующим образом:

$$\Delta\tau = \frac{2d}{c_{зв}^2} w, \qquad (III.42)$$

где d — база, т. е. расстояние между излучателем и приемником звука, w — вертикальная составляющая скорости ветра, $c_{зв}$ — скорость звука в воздухе.

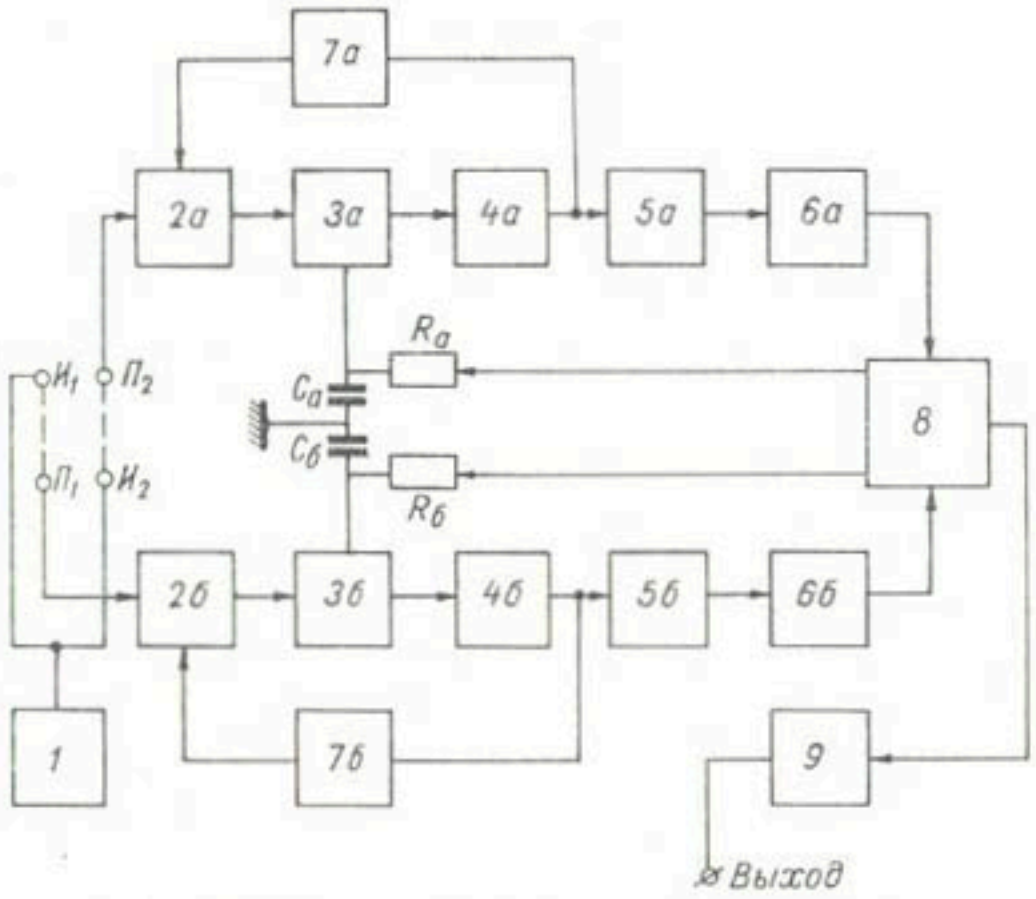


Рис. 54. Блок-схема ультразвукового анемометра.

$И_{1,2}$ — излучатели, $П_{1,2}$ — приемники, *1* — генератор, *2*, *3*, *4* — усилители, *5* — ограничитель, *6* — формирователь, *7* — цепь автоматической регулировки усиления, *8* — фазовый дискриминатор, *9* — фильтр.

При фазовом методе измерений разность фаз на выходе прибора зависит от рабочей частоты ω:

$$\Delta\varphi = \omega\,\Delta\tau = \frac{4\pi d f}{c_{зв}^2} w. \qquad (III.43)$$

Функциональная схема анемометра приведена на рис. 54. Блок датчиков состоит из двух малогабаритных пьезокерамических излучателей $И_1$ и $И_2$ и двух аналогичных приемников $П_1$ и $П_2$, расположение которых ясно из рисунка. Излучатели питаются синфазно от возбудителя *1*. Сигналы с выходов приемников поступают на усилители *2 а*, *3 а*, *4 а*, *2 б*, *3 б*, *4 б*, охваченные цепями автоматической регулировки усиления *5 а* и *5 б*, а с них после ограничения

(ограничители *6 а* и *6 б*) и формирования (*7 а* и *7 б*) — на фазовый дискриминатор *8*, осуществляющий демодуляцию фазового сдвига между каналами. После фильтрации выходное напряжение фазового дискриминатора сглаживается фильтром *9* и поступает на вход прибора обработки информации. Для эффективной отработки среднего уровня фазового сдвига между каналами, вызываемого как наличием постоянной составляющей вертикального потока скорости, так и температурными нестабильностями схемы, в приборе применена фазовая автоподстройка (ФАП). Она осуществляется путем подачи напряжения с фазового дискриминатора *8* через сглаживающие фильтры с большой постоянной времени R_1C_1 и R_2C_2 на управляемые конденсаторы контуров резонансных усилителей *3 а* и *3 б*.

В разработанной модели анемометра база равна 50 мм, диапазон измеряемых скоростей ± 2 м/сек., частотный диапазон 0,01—50 гц.

Прибор обработки информации

Этот прибор предназначен для приближенной реализации соотношения (III.38), т. е. для вычисления оценки взаимной корреляции величин w' и q' в виде среднего по времени (за интервал τ_0) значения произведения пульсаций этих величин. Выходной сигнал ультразвукового анемометра представляет собой меняющееся напряжение, сигнал гигрометра — последовательность импульсов переменной частоты. Поскольку в процессе работы, несмотря на эффективные системы автоподстройки, возможны уходы нулей обоих приборов, оценку величины потока пара E^* целесообразно выполнять по следующему алгоритму:

$$E^* = \frac{a}{\tau_0}\int_0^{\tau_0} U_a(t)\, f_r(t)\, dt - $$

$$- a\left[\frac{1}{\tau_0}\int_0^{\tau_0} U_a(t)\, dt \cdot \frac{1}{\tau_0}\int_0^{\tau_0} f_r(t)\, dt\right], \qquad \text{(III.44)}$$

где a — масштабный коэффициент, τ_0 — интервал осреднения, $U_a(t)$ — текущие значения выходного напряжения анемометра, $f_r(t)$ — текущие значения частоты импульсов на выходе гигрометра.

Выражение в скобках представляет собой произведение средних во времени значений сигналов анемометра и гигрометра.

В приборе обработки информации (рис. 55) применен частотно-временной метод перемножения сигналов анемометра и гигрометра. Для этой цели выходное напряжение анемометра преобразуется в длительность импульсов, которые заполняются сериями импульсов с выхода гигрометра. В результате образуются пакеты, число

импульсов в которых пропорционально произведению мгновенных значений пульсаций влагосодержания и вертикальной скорости. Пакеты импульсов поступают на вход счетчика, выполняющего вычисление среднего значения этого произведения.

Для вычисления интегралов, заключенных в скобки в выражении (III.44), на один из входов устройства необходимо подавать эталонное напряжение или эталонную частоту от встроенных источников.

Для упрощения устройства входящие в формулу (III.44) величины вычисляются последовательно в следующем порядке.

1. Контроль. На входы прибора поступают эталонное напряжение и эталонная частота от встроенных источников.

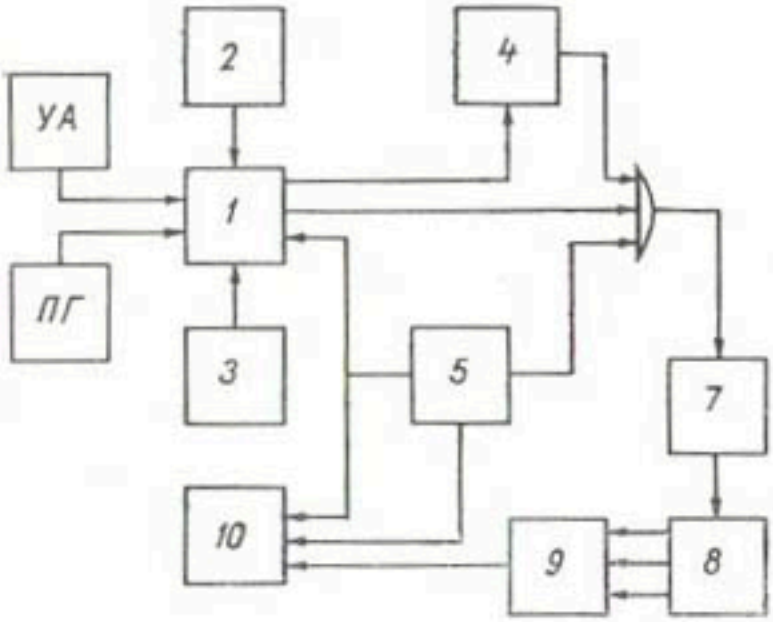


Рис. 55. Блок-схема прибора обработки информации.

УА — ультразвуковой анемометр, *ПГ* — пульсационный гигрометр. *1* — блок коммутации, *2* — источник эталонного напряжения, *3* — источник эталонной частоты, *4* — преобразователь напряжения в длительность, *5* — блок времени осреднения, *6* — ключ, *7—8* — счетчик, *9* — преобразователь кода в напряжение, *10* — регистратор напряжения (ПС1-10).

2. Вычисление $\frac{1}{\tau_0}\int_0^{\tau_0} f_г(t)\,dt$. В этом положении на входы прибора подается эталонное напряжение и выходной сигнал гигрометра.

3. Вычисление $\frac{1}{\tau_0}\int_0^{\tau_0} U_а(t)\,dt$. На входе прибора подается в этом случае эталонная частота и напряжение с выхода анемометра.

4. Вычисление $\frac{1}{\tau_0}\int_0^{\tau_0} U_а(t)\,f_г(t)\,dt$. На входы прибора подаются сигналы с выхода гигрометра и анемометра.

Выходное напряжение анемометра или эталонное напряжение поочередно подается на преобразователь напряжения в длительность импульса *4*, выходной сигнал преобразователя селектирует серии импульсов из выходного сигнала гигрометра (или из сигнала от генератора эталонной частоты *3*), открывая ключевую схему *6*. Кроме этих сигналов, на вход ключевой схемы поступает импульс с длительностью, равной выбранному интервалу осреднения (1, 2, 4 или 8 мин.) с выхода блока задания времени осреднения *5*. Таким

образом, при вычислении $\frac{1}{\tau_0}\int_0^{\tau_0} U_a(t) f_r(t)\,dt$ (пункт 4) на вход счетчика *7—8* в течение интервала осреднения подаются пакеты импульсов, имеющие длительность, пропорциональную мгновенным отсчетам пульсаций вертикальной скорости, и частоту заполнения, зависящую от мгновенных значений пульсаций влагосодержания.

Пакеты с выхода ключа *6* поступают на вход 18-разрядного счетчика *7—8*, старшие разряды которого связаны с преобразователем кода в аналоговую величину (напряжение) *9*.

Выходной сигнал преобразователя подается на стрелочный прибор-индикатор и на самопишущий 12-точечный милливольтметр *10* типа ПС1-10, коммутатор которого используется в качестве управляющего блока, задающего программу работы установки. С этой целью вход измерительного моста отключается от токосъемного кольца переключателя и непосредственно соединяется с преобразователем *10*; освободившийся переключатель совместно с блоком коммутации *1* осуществляет попеременную подачу на вход прибора обработки рабочих и эталонных напряжений, в соответствии с чем последовательно реализуются перечисленные режимы работы прибора. Необходимо отметить, что наличие в выходном сигнале гигрометра составляющей, которая зависит от температуры, приводит к тому, что оценка E^* оказывается завышенной на величину

$$\Delta E = \frac{\overline{q} + 4{,}5 \cdot 10^{-2} p}{T/T_0} P, \qquad \text{(III.45)}$$

где $\overline{q}$ — среднее значение влажности воздуха, p — атмосферное давление, T_0 — расчетное значение абсолютной температуры воздуха, T — истинное значение средней температуры воздуха при измерениях, P — турбулентный поток тепла.

Тогда

$$E = E^* - \Delta E. \qquad \text{(III.46)}$$

Очевидно, что наилучшие результаты могут быть получены, если поток тепла также измеряется пульсационным методом. Исходная расчетная формула аналогична (III.37).

В программе прибора обработки предусмотрены позиции, необходимые для вычисления P. В этом случае в комплект аппаратуры должен входить дополнительный датчик — пульсационный термометр. Величина теплового потока, используемая для расчета ΔE, может быть получена и любым другим методом, так как в данном случае нет нужды в точном определении потока.

Описанное устройство позволяет определять вертикальные турбулентные потоки водяного пара в пределах $\pm 0{,}7$ кал/см^2 мин. (или $\pm 0{,}7$ мм/час).

В процессе экспериментальной проверки работы приборов сравнивались данные по суммарному испарению, полученные с помощью

пульсационной аппаратуры и с помощью комплекта датчиков теплового баланса. Анализ материалов показывает, что оба метода дают близкие результаты, причем разрешающая способность во времени значительно выше у пульсационной аппаратуры, которая позволяет изучать изменения элементов баланса за малые промежутки времени. При измерении и обработке данных по методу теплового баланса автоматически осуществляется сглаживание суточного хода.

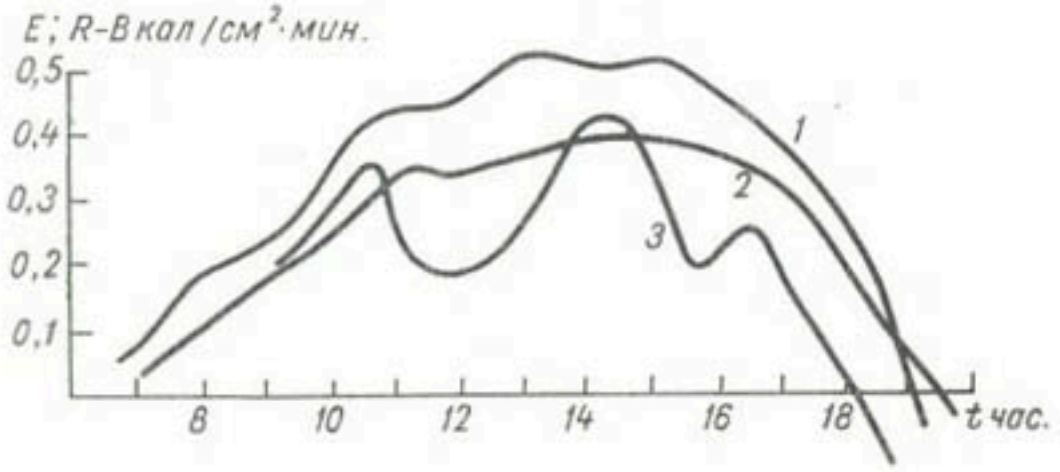


Рис. 56. Ход величин $R—B$ (*1*) и суммарного испарения, полученного с помощью теплобалансовой (*2*) и пульсационной (*3*) аппаратуры.

На рис. 56 показан ход величины $R—B$, а также суммарного испарения, определенного пульсационным методом и методом теплового баланса. Наблюдения проводились в августе 1969 г. в Ленинградской области.

§ 8. Параметры водного баланса поля

Достаточно полная характеристика влагообеспеченности сельскохозяйственного поля может быть получена при анализе водного баланса. Уравнение водного баланса площадки (независимо от ее размеров) в наиболее общей форме содержит элементы, соответствующие поступлению влаги в пределы площадки из атмосферы O (осадки), приток подпочвенных вод из смежных массивов $C_{\text{п}}$, подачу воды для орошения сельскохозяйственных полей $M_{\text{п}}$, поступление влаги по поверхности почвы $П_{\text{п}}$. Расходная часть балакса предусматривает возможность выноса влаги в атмосферу E (испарение), сток воды по поверхности $П_{\text{р}}$ или за счет внутрипочвенных потоков влаги $C_{\text{р}}$, а также сброс оросительной воды за пределы балансового участка $M_{\text{р}}$.

Разность между притоком и расходом обусловлена изменением влагосодержания почвы ΔW, а также аккумуляцией влаги ΔU на поверхности и в глубине рассматриваемого слоя почвы. Затраты воды на фотосинтез и образование зеленой массы растительного покрова, которые теоретически также должны учитываться в вод-

ном балансе, обычно не принимаются во внимание, так как эта составляющая значительно меньше других элементов и значения погрешности замыкания баланса.

В наиболее общей форме водный баланс деятельной поверхности можно представить так:

$$O + П_п + C_п + M_п = E + П_р + C_р + M_р + \Delta W + \Delta U. \quad \text{(III.47)}$$

В зависимости от глубины рассматриваемого слоя и площади участка, для которого составляется водный баланс, а также от конкретных задач расчета уравнение практически реализуется с различной степенью детализации элементов баланса. Так, например, среди элементов стока подпочвенных вод могут рассматриваться сток грунтовых вод и сток внутрипочвенной влаги — составляющие, которые определяются для границ балансового участка. Кроме того, пополнение грунтовых вод происходит также и в пределах балансового участка за счет фильтрации воды из магистральных и хозяйственных каналов оросительной системы.

В некоторых случаях учитывают раздельно $E_п$ — суммарное испарение с полей и $E_в$ — испарение с поверхности водоемов и каналов.

С точки зрения объемов рассматриваемых зон наиболее часто разделяют два типичных случая: 1) зона аэрации и водоносный слой (без учета обмена влагой между водоносным и более глубокими слоями), 2) корнеобитаемый слой, составляющий верхнюю часть зоны аэрации. В последнем случае, как правило, из баланса влаги исключаются составляющие, связанные с перемещением грунтовой и внутрипочвенной влаги, и вводятся показатели, учитывающие обмен между корнеобитаемым слоем и нижележащим грунтом: восходящий поток влаги по капиллярам $K_п$ и инфильтрация $K_р$.

В зависимости от размеров балансового участка необходимо рассматривать различные сочетания элементов водного баланса. Наиболее полные формы уравнения (III.47) используются при анализе и прогнозах влагообеспеченности больших районов, при расчете и проектировании каналов, оросительных систем и гидромелиоративных комплексов. В этом случае расчеты водного баланса относят, как правило, к значительным интервалам времени, для которых изменения влагозапасов почвы и аккумуляция влаги пренебрежимо малы по сравнению с другими элементами баланса и могут быть исключены из основного уравнения. Для достаточно больших территорий водный баланс складывается по существу из баланса грунтовых вод, обмена влагой в атмосфере и баланса оросительной воды.

Кроме крупномасштабных расчетов, схема водного баланса находит широкое применение при оценках влагообеспеченности отдельных полей, при расчетах суммарного испарения, а также практически реализуется в специальной измерительной аппаратуре — испарителях. Для каждого случая используется своя

модификация уравнения баланса, связанная с определенными ограничениями и исключением некоторых элементов баланса.

При использовании метода водного баланса для малых площадей большое значение имеет правильный выбор продолжительности расчетного интервала времени. Этот фактор лимитируется в основном необходимостью получения заданной точности измерений элементов баланса. Распространенные методы измерений элементов имеют точность порядка 10—12%, повысить эту точность можно при правильном выборе продолжительности измерений. Выбор интервала и времени измерений влияет и на точность баланса в целом.

Применение метода водного баланса для отдельного поля при определении суммарного испарения или изменения влагозапасов почвы дает возможность получать искомые параметры с точностью 10—15% за интервалы времени не меньше декады или месяца. Кроме того, возможность достаточно точной увязки баланса за малые промежутки времени ограничивается также и временем прохождения инфильтрационного потока воды через толщу балансовой зоны. Для исключения влияния инфильтрации увеличивают расчетный промежуток времени заведомо за пределы срока инфильтрации или сдвигают во времени момент начала наблюдений таким образом, чтобы в расчетный период не попадали периоды нестационарного водного режима рассматриваемого слоя.

Элементы водного баланса определяются большим комплексом факторов. Так, например, уже отмечалось, что суммарное испарение значительно меняется в процессе роста вегетативной массы растений. Этот же фактор может в широких пределах изменять соотношение между осадками и поверхностным стоком. Перехват осадков растительностью приводит к замедлению стекания осадков по листьям и стеблям. С другой стороны, развитый травостой способствует увеличению сопротивления поверхностного стока. Распространение корневой системы в процессе развития растений непрерывно увеличивает зону водного питания и требует соответствующей коррекции толщины активного слоя почвы.

Другой пример: возможность влияния обработки почвы на элементы водного баланса. Помимо очевидного воздействия рыхления на физическое испарение с почвы, возможны некоторые побочные эффекты. Появление в почве уплотненных структур с малой водопроницаемостью (пахотная подошва) приводит в некоторых случаях к возникновению в корнеобитаемом слое внутрипочвенных потоков даже в случаях глубокого залегания грунтовых вод.

Основные элементы водного баланса подлежат экспериментальному определению. Для этой цели используется и стандартная и специальная аппаратура [23, 37, 40]. Для оценки влагообеспеченности сельскохозяйственного поля, как правило, необходимо определение осадков, поверхностного стока, оросительной воды, суммарного испарения и влагозапаса почвы. При этом часто один из элементов рассчитывается как остаточный член баланса, не-

посредственно по уравнению. Но такой метод не всегда может обеспечить достаточную точность, так как в общей ошибке измерений искомого элемента суммируются погрешности определения всех остальных составляющих баланса.

Осадки измеряются стандартной аппаратурой Гидрометслужбы. Составляя баланс влаги для отдельного поля или малой площадки, особенно для аридной зоны, следует иметь в виду значительную изменчивость осадков в пространстве. В связи с этим следует с особой осторожностью относиться к экстраполяции данных ближайших метеостанций непосредственно на балансовый участок. При необходимости точных расчетов надо организовать наблюдения за осадками непосредственно на участке наблюдений.

Определение расхода воды на орошение обусловливается типом оросительной системы. В открытых системах для этой цели обычно применяются водосливы или измерительные колодцы, в системах с дождеванием — измерители расхода жидкости в трубопроводах. Для измерения поверхностного стока в основном используются лотковые измерители с ручной или автоматической регистрацией количества влаги.

В случаях, когда это необходимо, суммарное испарение может быть определено любым доступным методом из числа рассмотренных выше.

Изменение влагосодержания почвы ΔW определяется по динамике влажности. Для этой цели могут использоваться любые из рассмотренных ранее методов, но наиболее пригодны приборы, измеряющие среднюю влажность в достаточно большом объеме.

При существенном уменьшении балансового участка и ограничении объема почвы, для которого составляется баланс, значительно упрощаются и чисто измерительные задачи. Этот случай практически реализуется в воднобалансовой аппаратуре типа испарителей или лизиметров. За счет изоляции балансового объема становится возможным ограничить баланс двумя-тремя элементами. В подобных случаях результирующие изменения влагосодержания могут быть определены путем взвешивания.

Далее мы не будем рассматривать детали, связанные с реализацией метода водного баланса для сельскохозяйственного поля, а остановимся подробнее на основных принципах конструкций комплексной воднобалансовой аппаратуры.

§ 9. Аппаратура для измерения элементов водного баланса

Измерения по схеме водного баланса могут быть реализованы с помощью специальных установок, в которых необходимые операции производятся на почвенном блоке, изолированном от массива сельскохозяйственного поля [15, 35]. Такой почвенный блок по существу представляет собой модель зоны аэрации почвенного

покрова. В зависимости от целей исследования меняются размеры блока и конструктивное выполнение установки. От этих факторов зависит также и точность моделирования процессов.

Зона аэрации представляет собой поверхностный слой почвы, в котором макропоры не заполнены влагой. Характерной особенностью этого слоя, в котором, как правило, располагается корневая система растения, является активный газообмен (как внутренний, так и внешний — с наружным воздухом). Зона аэрации располагается от поверхности почвы до границы капиллярной каймы, обусловленной грунтовыми водами.

Практически реализуется несколько типов установок. В соответствии с принятой классификацией их разделяют на:

1) лизиметры, предназначенные для измерений инфильтрации воды;

2) лизиметры-испарители, обеспечивающие совместное измерение испарения и инфильтрации;

3) испарители, измеряющие суммарное испарение с поверхности почвы;

4) компенсационные испарители, применение которых позволяет определять инфильтрацию и суммарное испарение с поверхности почвы при разной глубине залегания грунтовых вод;

5) воднобалансовые площадки, предназначенные в основном для измерения поверхностного и подземного стока;

6) балансомеры, обеспечивающие комплексное измерение основных элементов баланса влаги: осадков, стока по поверхности, инфильтрации, суммарного испарения с поверхности почвы и т. д.

Установки первой группы позволяют решать единичную задачу — определение инфильтрации и поэтому применяются редко (обычно в сочетании с другой воднобалансовой аппаратурой).

Установки пятой и шестой групп представляют собой сложные стационарные исследовательские комплексы (особенно это относится к балансомерам) и имеются в основном на базах крупных научно-исследовательских организаций. Аппаратура такого рода необходима при комплексных исследованиях водного баланса.

В практике агрометеорологических, агрофизических и гидромелиоративных исследований получили распространение в основном установки второй, третьей и четвертой групп, которые и будут рассмотрены подробнее. Они позволяют решать ряд практически важных задач, связанных с оценками водопотребления растений.

Помимо основного деления установок по функциональным признакам, лизиметры и испарители могут классифицироваться по структуре загружаемого грунта.

Установки с загрузкой почвенного монолита с ненарушенной структурой воспроизводят естественные процессы перемещения и испарения влаги с наименьшими ошибками. Но создание подобных установок связано с известными трудностями, особенно в случаях большой глубины зоны аэрации. Получение, транспортировка и

монтаж в установке почвенного монолита большой толщины требуют значительных затрат труда, тем более, что обычно эти блоки имеют большую площадь.

Установки с загрузкой почвенного блока нарушенной структуры обладают существенно большей погрешностью измерений при значительно сниженной трудоемкости изготовления модели. При загрузке блока почвы для снижения погрешности иногда применяют послойную укладку и уплотнение. В этом случае для формирования какого-либо горизонта в модельном почвенном блоке используется почва, взятая с этого же горизонта в поле. Иногда при загрузке используют и серии послойных монолитов небольшой толщины.

Основной источник ошибок при измерениях на моделях зоны аэрации связан с нарушением естественного обмена теплом и влагой между блоком и окружающей средой, а также с искажением естественного температурного режима почвы теплопроводными несущими конструкциями аппаратуры.

При правильной организации исследований почти всегда можно исключить ошибки, связанные с боковым влаго- и газообменом блока. Большие трудности возникают при необходимости корректировки влагообмена через дно монолита. Это обычно бывает при исследованиях в условиях переменного уровня грунтовых вод.

Нарушения температурного поля в воднобалансовой аппаратуре, как правило, не компенсируются и оказывают существенное влияние на результаты измерений в случаях, когда процессы термопереноса могут внести значительный вклад в общее перемещение влаги. Дополнительные градиенты температуры в экспериментальных установках могут усиливать или тормозить капиллярные токи воды и пара.

Для исключения температурных ошибок стремятся уменьшить теплопроводность корпуса установки. С этой целью для изоляции почвенного блока испарителя применялась относительно толстая полимерная пленка. Конструкции испарителей такого рода можно использовать не для всех почв и культур. Пленочное ограждение может повреждаться за счет непредвиденных механических воздействий (рост корней, грызуны и т. п.).

Из перечисленных выше установок для определения различных параметров влагообеспеченности растений чаще всего применяются почвенные испарители со взвешиваемым монолитом и компенсационные испарители с фиксированным уровнем грунтовых вод. Последние не вполне точно называют просто лизиметрами.

Почвенные испарители

В обычно применяемом варианте конструкции почвенный испаритель представляет собой металлический бак (рис. 57) цилиндрической или прямоугольной формы, в который помещен

почвенный монолит с ненарушенной структурой. Для определения испарения с помощью почвенного испарителя бак с монолитом периодически взвешивают. Корпус испарителя имеет сетчатое дно, благодаря которому избыток влаги из почвенного монолита удаляется.

При исследованиях с почвенными испарителями предполагается, что испарение влаги с поверхности обеспечивается за счет изменения влагосодержания монолита. Учет выпавших осадков и количества просочившейся в водосборник влаги дает возможность определять рост влагосодержания почвы за счет осадков.

Как правило, почвенные испарители устанавливаются в специальные гнезда таким образом, чтобы поверхность почвы модельного монолита совпадала с уровнем поверхности поля.

Наибольшее распространение в СССР получили испарители ГГИ-500, у которых взвешивание осуществляется при изъятии мо-

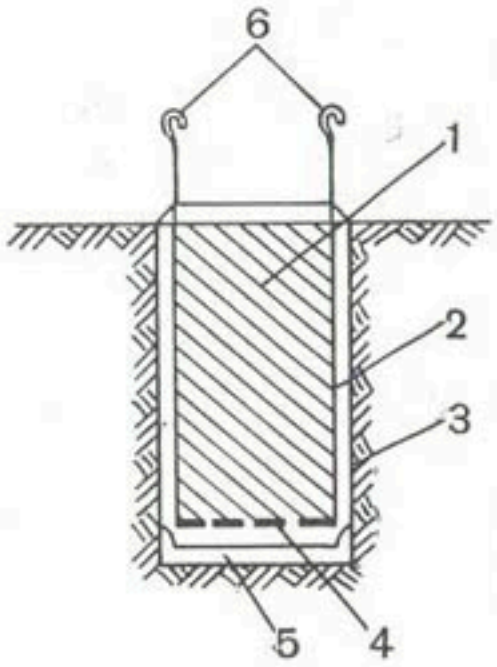


Рис. 57. Схема устройства почвенного испарителя.

1 — почвенный монолит, *2* — гильза монолита, *3* — стенка гнезда, *4* — перфорированное дно, *5* — сосуд для сбора просочившейся влаги, *6* — арматура для подъема и взвешивания почвенного монолита.

нолита. Наружный кожух испарителя, установленный в почве, имеет поддон с водосборным сосудом, а внутренний цилиндр снабжен крючьями, необходимыми при снятии монолита для взвешивания. Испарители такого типа обеспечивают дискретные измерения с интервалом 3—5 дней при условии, что взвешивание обеспечивает определение расхода воды на суммарное испарение с точностью 0,2—0,3 мм водяного слоя.

Уменьшение интервала между взвешиваниями приводит к росту относительной погрешности измерений, так как в условиях поля трудно осуществить достаточно точное взвешивание, а изменения веса становятся малыми.

Непрерывные измерения испарения по динамике влагосодержания почвенного монолита могут быть осуществлены при использовании гидравлических испарителей (рис. 58). В таких установках почвенный монолит размещается на понтоне, погруженном в бак с водой. Изменения веса фиксируются по вертикальным перемещениям понтона с помощью специального электроконтактного микрометра.

Гидравлические испарители значительно дороже и сложнее в монтаже и работе, чем приборы типа ГГИ-500.

Взвешиваемые лизиметры-испарители (рис. 59) конструктивно оформляются аналогично и дополняются устройствами измерения поверхностного стока и инфильтрации, размещаемыми в специальном колодце вблизи испарительного блока.

Общий недостаток испарителей — необходимость периодической смены почвенных монолитов. Такая необходимость обусловлена иссушением монолита из-за его изоляции от нижележащих слоев почвы, обеспечивающих подпитку влагой поверхностного слоя. При глубине монолита от 0,5 до 1,0 м в нормальных условиях его сле-

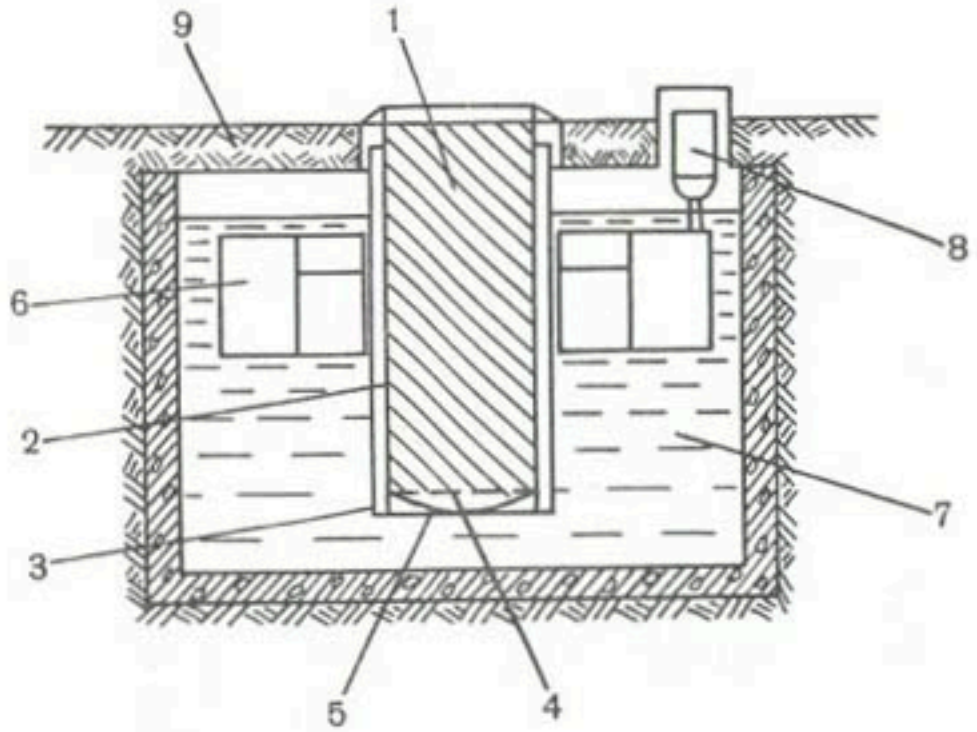


Рис. 58. Схема устройства гидравлического испарителя.

1 — почвенный монолит, *2* — гильза монолита, *3* — стенка гнезда, *4* — перфорированное дно, *5* — сосуд для сбора просочившейся влаги, *6* — арматура поплавка, *7* — вода, *8* — приспособление для регистрации изменений веса почвенного монолита, *9* — засыпка почвой крышки испарителя.

дует менять ежемесячно. Для зоны недостаточного увлажнения смену монолита приходится осуществлять два раза в месяц во избежание пересушивания монолита по сравнению с основным массивом поля. Эти данные подтверждены для парового поля, луга и поля зерновых культур. В случае применения почвенных испарителей на интенсивно испаряющих культурах с большим удельным объемом зеленой массы частота смены монолитов должна уточняться для конкретных условий опыта.

Существует схема использования парных испарителей, один из которых имеет обычную конструкцию, а второй лишен поддона в наружном кожухе. По этой схеме один монолит работает в режиме измерения и установлен в испарителе с поддоном. Во втором кожухе установлен парный монолит. Он находится в контакте с нижележащими слоями почвы и по идее должен насыщаться

влагой до нормального состояния, характеризующего поверхностный слой массива поля. Однако опыты показали, что такое насыщение монолита влагой происходит только в условиях высокой влажности почвы на поле (вблизи полевой влагоемкости). При более низкой влажности почвы выравнивание условий в резервном испарителе идет медленно и нормальная влажность поверхностных слоев фактически не устанавливается. Это обусловлено высоким переходным сопротивлением между массивом и резервным монолитом и связано с нарушением естественной структуры почвы в переходном слое. Хотя таким способом и не удается полностью компенсировать погрешность, все же срок продуктивного

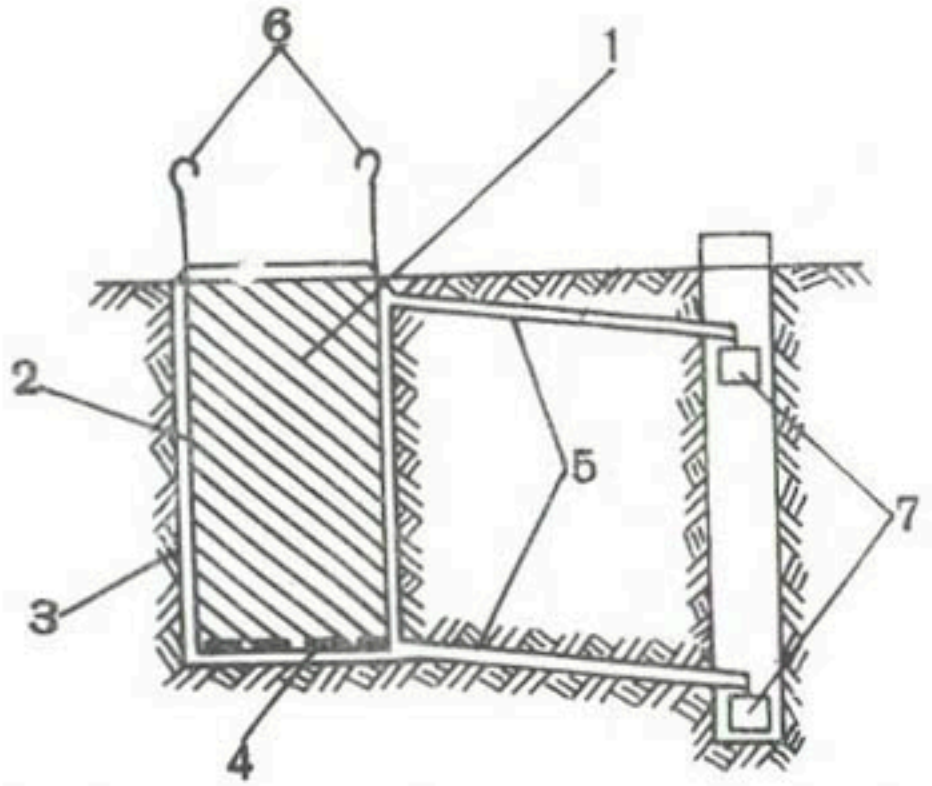


Рис. 59. Схема устройства взвешиваемого лизиметра-испарителя.

1 — почвенный монолит, *2* — гильза монолита, *3* — стенка гнезда, *4* — перфорированное дно, *5* — трубки для отвода воды, *6* — арматура для подъема и взвешивания монолита, *7* — сосуды для сбора воды и измерения поверхностного стока и инфильтрации.

использования монолитов увеличивается, а средняя точность измерений повышается.

Площадь активной поверхности испарителя в различных вариантах конструкции меняется от 0,05 до 1 м². В этих пределах результаты измерений относительно мало зависят от размера испарителя. Выбор модели испарителя по размерам обусловливается характером растительного покрова изучаемой культуры, а также величиной зоны корневого питания.

Почвенные испарители при наличии всех упоминавшихся выше недостатков обладают рядом существенных преимуществ перед другими методами определения испарения и оценки баланса влаги в корнеобитаемом слое. Достоинства их сводятся в основном к простоте реализации измерений, для которых не требуется сложного оборудования.

Правильная организация работы с почвенными испарителями (точная установка, обоснованная смена монолитов и повторность измерений, оценка влияния температуры на точность и т. п.) позволяет получать с их помощью достаточно надежные данные по отдельным элементам водного баланса.

Компенсационные испарители с фиксированным уровнем грунтовых вод

Установки такого типа конструктивно незначительно отличаются от почвенных испарителей (рис. 60). В простейших вариантах эти различия сводятся к использованию обратного фильтра и системы подачи влаги с контролем ее уровня. Более сложные

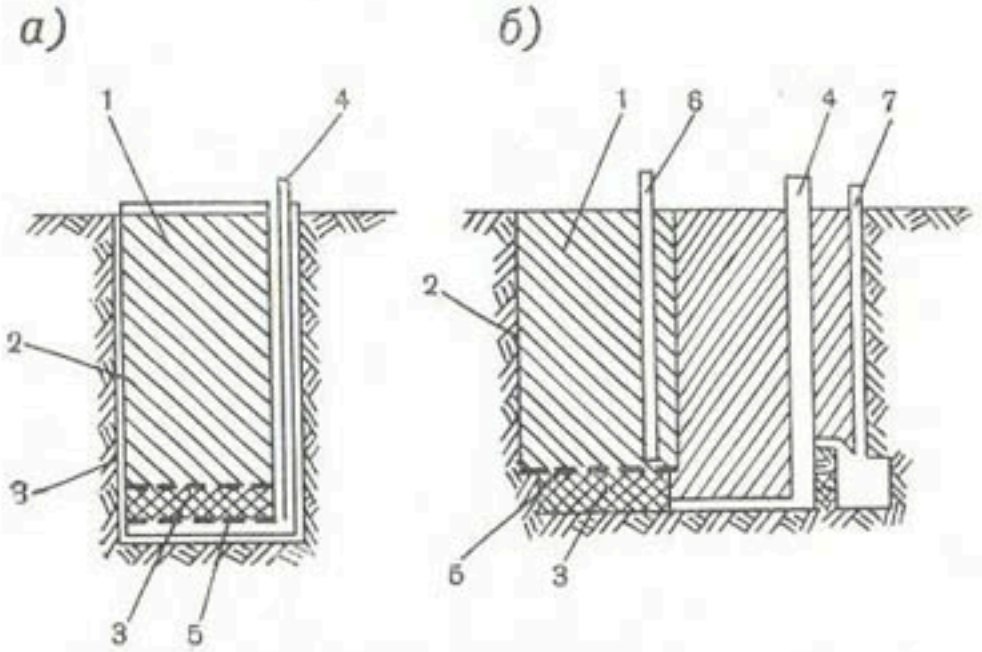


Рис. 60. Схема устройства лизиметра с фиксированным уровнем грунтовых вод.

а — вариант с подачей влаги через гнездо монолита, *б* — вариант с вынесенной системой подачи воды; *1* — почвенный монолит, *2* — гильза монолита, *3* — обратный фильтр, *4* — подпитывающее устройство, *5* — перфорированное дно, *6* — контрольная скважина, *7* — трубка для откачки воды, *8* — стенка гнезда.

конструкции предусматривают разделение подпитывающих и контрольных колодцев, а также различные варианты устройств для поддержания фиксированного уровня грунтовых вод в модели. Простейший вариант подобного устройства (рис. 60) рассчитан на ручной периодический долив воды. В более сложных конструкциях установок, обычно используемых в капитальных стационарных лизиметрических комплексах, применяются подпитывающие устройства непрерывного действия. Наиболее широко распространены системы с сосудами Мариотта и поплавковые регуляторы уровня с игольчатыми клапанами на магистралях подпитки.

Площадь компенсационных испарителей выбирается по тем же нормам, что и почвенных, а глубина определяется исходя из

целей их применения. Для повышения репрезентативности данных следят за тем, чтобы заливка испарителей производилась водой, в которой концентрация солей соответствует фактическим данным грунтовых вод.

В практике измерений компенсационные испарители используются в двух типовых режимах работы. Один режим — измерения испаряемости — предусматривает поддержание в испарителе уровня воды, обеспечивающего оптимальную влагообеспеченность растений в почвенном монолите. В этом случае расход воды соответствует максимально возможному испарению растительного покрова.

Так как условия оптимальной влагообеспеченности зависят от распространения корневой системы растений, в течение вегетационного периода должен изменяться уровень горизонта грунтовых вод в компенсационном испарителе. График изменения уровня грунтовых вод в зависимости от фазы вегетации должен быть установлен в процессе предварительных экспериментов.

Величина испаряемости, полученная с помощью компенсационного испарителя, обычно несколько завышена по сравнению с истинным значением этого параметра. Это объясняется тем, что небольшая площадка почвенного монолита с оптимальной влагообеспеченностью размещается в массиве поля, для которого оптимальные условия не выполняются. В результате повышается интенсивность процессов обмена за счет наличия горизонтальных градиентов влажности воздуха в зоне растительного покрова.

Для компенсационных испарителей в режиме измерения испаряемости глубина зависит от распространения корневой системы исследуемого растения и обычно не превышает 1,5 м.

Второй режим работы компенсационных испарителей — режим измерения суммарного испарения поля — используется в районах с относительно неглубоким залеганием грунтовых вод. В этом случае в испарителе должен поддерживаться естественный уровень грунтовых вод, а расход воды при доливе — соответствовать суммарному испарению за период измерений. Условия влагообеспеченности растений в модельном монолите и на массиве поля совпадают, и ошибка в определении суммарного испарения оказывается минимальной.

Необходимая глубина размещения монолитов компенсационных испарителей для использования в таком режиме определяется предельным заглублением уровня грунтовых вод. Как правило, высота модельного монолита не превышает 4—5 м, хотя в специальных случаях при исследовании миграции солей установки такого типа могут иметь глубину до 15—20 м.

Ошибки в измерении суммарного испарения возникают по двум основным причинам. Относительно небольшие систематические погрешности измерений связаны с различиями поступления влаги в почвенный монолит при условиях его размещения в почвенном массиве и при питании влагой через обратный фильтр, структура

которого существенно отличается от почвенной подошвы. Специальные исследования дают возможность оценить необходимые поправки.

Более серьезная ошибка измерений связана с тем, что распространенные модели компенсационных испарителей работают с фиксированным уровнем грунтовых вод, в то время как в природных условиях уровень грунтовых вод непрерывно перемещается под влиянием внешних воздействий, причем размах изменений уровня может достигать нескольких метров за сезон.

В установках с ручным доливом эти ошибки иногда можно корректировать, но в системах автоматического долива изменение горизонта воды вызывает существенные трудности. Комбинированные системы слежения за уровнем грунтовых вод достаточно сложны, и их применение возможно только в капитальных лизиметрических комплексах.

Решение этого круга вопросов существенно облегчится при повышении точности измерений уровня грунтовых вод, которая до последнего времени была недостаточной. Появившиеся разработки акустических измерителей будут способствовать снижению ошибок измерений испарения с помощью компенсационных испарителей.

Помимо указанных погрешностей измерений, серьезным недостатком компенсационных испарителей является их высокая стоимость и необходимость строительства довольно сложных капитальных сооружений. Основное же преимущество установок этой группы по сравнению с почвенными испарителями в том, что отпадает необходимость в смене почвенных монолитов, а это серьезно облегчает организацию наблюдений.

Компенсационные испарители позволяют комплексно изучать процессы перемещения влаги и солей в почве, поэтому широко используются в специальных исследованиях. Для этих целей сооружаются стационарные площадки с набором лизиметров и испарителей различного назначения и разной глубины. Обычно органы подпитки влагой компенсационных испарителей концентрируются в специальном подземном бункере, а комплекс регистрирующей аппаратуры устанавливается в наземном павильоне. Установки для определения элементов водного баланса, помимо регистраторов уровня и расхода грунтовых вод, обычно оснащаются датчиками температуры и влажности почвы, а также датчиками концентрации соли в почве. Набор чувствительных элементов обеспечивает измерение профилей указанных параметров по всей глубине почвенного блока.

Помимо рассмотренных установок, до последнего времени для определения испаряемости применялись также и водяные испарители. Их использование основывалось на недостаточно обоснованном предположении, что максимально возможное испарение наблюдается с открытой водной поверхности. Значение испаряемости в этом случае определялось по уменьшению количества воды (изменению уровня) в плоском неглубоком сосуде за определенный

интервал времени. Обычно водяные испарители устанавливались в растительном покрове на специальной арматуре таким образом, чтобы поверхность воды совпадала с уровнем деятельной поверхности.

Данные, полученные с помощью водяных испарителей, существенно отличаются от истинных значений измеряемых параметров вследствие больших различий в процессах формирования баланса влаги и энергии на поверхности воды и растительного покрова. Водяные испарители могут дать лишь грубую оценку измеряемых показателей водообеспеченности.

§ 10. Аппаратура для оценки интенсивности фотосинтеза по потоку углекислого газа

До последнего времени возможности оценки интенсивности фотосинтеза растительного покрова в полевых условиях по поглощению углекислого газа были весьма ограничены. Практические методы определения CO_2 основывались преимущественно на изоляции растения или его частей. В этом случае газ анализировался в изолированном объеме. Методы такого типа имеют те же источники погрешностей, что и рассмотренные в главе I. При измерении потребления углекислого газа трудности, отмеченные для определения транспирации, усугубляются за счет относительно сложных методов измерения концентрации CO_2.

При полевых измерениях концентрации углекислоты наиболее широко используются методы химической индикации. Заданное количество воздуха обычно пропускают через буферный поглотитель, анализ которого позволяет определить количество поглощенного газа. Для относительно грубых оценок целесообразно применять разработанный в последние годы визуальный колориметрический метод. При его реализации заранее подготавливают шкалу стандартных буферов на заданный диапазон изменений концентрации, учитывая желательную точность измерений. Визуальные определения цвета индикатора позволяют определять изменения pH буферного раствора, связанные с изменением концентрации CO_2 в воздухе.

Появившиеся относительно недавно электронные газоанализаторы до сих пор еще не находят достаточного применения в практике полевых исследований фотосинтеза, хотя широко используются при измерениях интенсивности газового обмена в камерах для выращивания растений в контролируемых условиях.

В Агрофизическом институте в 1966 г. Ю. Е. Гиршовичем завершена разработка градиентного газоанализатора углекислого газа, предназначенного для использования в полевых исследованиях [7]. Прибор создан на базе оптико-акустического газоанализатора. Как известно, работа оптико-акустических приборов основана на использовании спектральных зависимостей поглощения

излучения в исследуемом материале. В частности, для измерения концентрации CO_2 использовано наличие двух широких полос поглощения в ближней инфракрасной области спектра. Излучение специального источника проходит через кювету, заполненную исследуемым газом. За счет поглощения в газе общая энергия излучения уменьшается. Остаточная энергия измеряется в акустической камере, в которой за счет энергии излучения происходит нагрев газа. Для абсолютных измерений концентрации используют две кюветы, одна из которых заполнена эталонным газом, по отношению к которому и ведутся измерения. Оптико-акустическая камера в приборах имеет два приемных окна у каждой из кювет. При модуляции светового луча амплитуда колебаний температуры в камере будет пропорциональной разности интенсивностей излучения двух лучей, прошедших через соответствующие кюветы. В акустической камере возникают колебания звуковой частоты, которые с помощью микрофона преобразуются в электрический сигнал. подвергаемый далее необходимой обработке.

В градиентном газоанализаторе вместо эталонного образца используется вторая рабочая измерительная кювета. Таким образом, прибор измеряет разность (или перепад) концентраций углекислого газа между двумя уровнями, на которых производится забор воздуха.

Градиентный газоанализатор построен на основе стандартного прибора модели ОА5501, выпускаемого отечественной промышленностью (диапазон измерений прибора 0—0,01% по объему).

Изменения в приборе, связанные с его приспособлением для градиентных измерений, в основном сводятся к коррекции пневматической схемы (дополнительная система вентилей для тарировки, дополнительный побудитель расхода и т. п.). Помимо этого, подстраивается электронная схема измерений.

Процесс тарировки сводится к регулировке чувствительности аппаратуры при подаче в обе кюветы эталонной смеси с фиксированным содержанием углекислоты. Перепады объемного содержания углекислого газа между двумя кюветами создаются за счет регулируемых изменений давления эталонной смеси. Изменение давления осуществляется раздельно по обеим кюветам и контролируется водяным дифференциальным манометром. Разность концентраций при тарировке ΔC определяется по формуле

$$\Delta C = \frac{C_0 \Delta p}{p_0 n}; \qquad \text{(III.48)}$$

здесь C_0 — концентрация CO_2 в контрольной эталонной смеси; p_0 — атмосферное давление; n — показания прибора; Δp — перепад давления между кюветами для эталонной смеси, измеренный дифференциальным манометром.

При такой системе моделирования перепадов концентрации погрешность тарировки не превышает 2% и определяется погрешностью анализа эталонной газовой смеси, которая задает средний

уровень концентрации. Градиентный газоанализатор обеспечивает измерения перепадов концентрации CO_2 в диапазоне $0 \div \pm 0{,}0025\%$ по объему с суммарной относительной погрешностью не более 5% верхнего предела измерений. Абсолютная концентрация углекислого газа в атмосфере может меняться от 0,028 до 0,034% по объему. Пороговая чувствительность по перепаду концентрации соответствует цене деления индикатора и составляет 0,00005% CO_2.

Поток углекислого газа может быть рассчитан по измеренному значению перепада концентрации CO_2 с привлечением метода турбулентной диффузии, полагающего равенство коэффициентов переноса пассивных субстанций в турбулентной атмосфере [47]. При этом значение коэффициента турбулентного обмена K может быть определено любым из применяемых методов, а значение потока углекислого газа F равно

$$F = aK\,\Delta C. \qquad \text{(III.49)}$$

Этот метод использовался Ю. Е. Гиршовичем для исследований в лабораторных и полевых условиях. Градиентный газоанализатор работал в комплексе с теплобалансографом Розенштока, в котором определение коэффициента обмена реализуется по расчетной схеме метода теплового баланса [формула (III.14)].

Экспериментальные данные, полученные на этой установке, приведены на рис. 11.

§ 11. Использование агрометеорологических оценок влагообеспеченности сельскохозяйственного поля для управления поливом

Поскольку агрометеорологические параметры являются косвенными показателями влагообеспеченности сельскохозяйственного поля, прямое применение их для определения норм полива затруднительно. Из этой группы параметров в качестве критерия оценок влагообеспеченности поля можно использовать значение суммарного испарения и интегральную величину влагозапаса почвы. В данном случае не имеет значения методика определения испарения, влияющая на точность и репрезентативность численных материалов.

При любой точности расчета испарения принципиальная возможность такого применения этого параметра для оценок влагообеспеченности поля не вполне очевидна. Ранее (глава I) отмечалось, что транспирация — относительно консервативный параметр, по величине которого дефицит влагообеспеченности может быть обнаружен со значительным опозданием, когда он становится уже достаточно глубоким и приводит к нарушениям основных физиологических функций растения. Это связано с комбинированной зависимостью транспирации от метеорологических и физиологических факторов. Причем диапазон изменения транспира-

ции при указанных воздействиях значительно шире допустимых пределов этого параметра, связанных с изменениями влагообеспеченности растений.

Для условий сомкнутого растительного покрова, когда суммарное испарение практически равно транспирации, все эти положения автоматически переносятся и на суммарное испарение.

Таким образом, абсолютная величина суммарного испарения не может использоваться для оценки влагообеспеченности сельскохозяйственного поля. Для такой оценки необходимо сопоставить фактическое суммарное испарение с потребностями растительной среды и метеорологическими условиями. Обычно для этого стараются привести фактическое значение испарения к нормальным условиям, используя коэффициенты отклонения от стандартных режимов выращивания.

Один из вариантов предложен А. М. Алпатьевым [1], разработавшим метод прогноза влагообеспеченности поля по сезонному ходу биологических коэффициентов. Биологический коэффициент представляет собой валовое потребление влаги, приведенное к заданным нормальным метеорологическим условиям. График сезонного хода биологического коэффициента отражает изменение потребности растения во влаге в течение вегетационного периода и составляется по данным о валовом расходе воды при оптимальной влагообеспеченности сельскохозяйственного поля (например, при влажности почвы около 70% полевой влагоемкости). Для расчета биологических коэффициентов валовой расход воды полем (за декаду или за сутки) относят к условной величине испаряемости, рассчитанной по одной из эмпирических формул (А. М. Алпатьев использует формулу Н. Н. Иванова). Биологические кривые одной культуры могут быть различны при выращивании растений в разных зонах и в различных режимах питания. Этот факт отражает влияние всего комплекса факторов на ход развития растений.

Для повышения репрезентативности биологических кривых рекомендуется при их построении использовать средние данные за несколько лет. Пример биологических кривых дан на рис. 4. В более поздних работах рассматриваются возможности аналогичного использования другого класса коэффициентов, в которых валовой расход сопоставляется с суммами дефицита влажности и температуры воздуха.

Валовой расход воды практически равен суммарному испарению. Метеоэлементы типа дефицита влажности обусловливают величину испаряемости и сильно коррелированы с ней. Поэтому относительные параметры, определяемые при оптимальной влажности почвы, действительно отражают потребности растений при нелимитированном водоснабжении и приведенных к норме метеоусловиях.

Для управления поливом фактическое значение биологического коэффициента за сутки или за декаду сравнивается с нормативом, который задается биологической кривой. По пределу

допустимого расхождения этих значений может определяться срок, а по фактической разности рассчитываться норма полива.

Другой метод определения биологических коэффициентов предложен А. Р. Константиновым [11]. Он опирается на своеобразный способ оценки испарения и испаряемости, основанной на методе турбулентной диффузии в несколько измененном виде. Все необходимые для расчета параметры определяются по корреляционным соотношениям между ними и стандартными метеорологическими данными (температуре и влажности воздуха на высоте 2 м — в метеорологической будке).

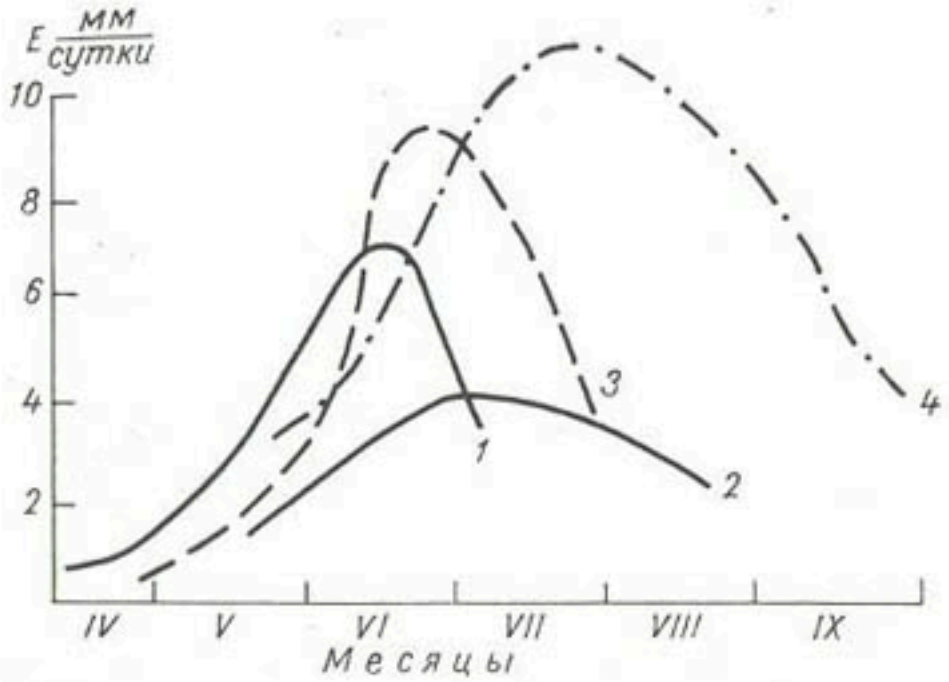


Рис. 61. Биологические кривые изменения интенсивности испарения в течение периода вегетации.

1 — яровая пшеница (Северный Кавказ), *2* — яровая пшеница (Средний Урал), *3* — просо, *4* — хлопчатник (Средняя Азия).

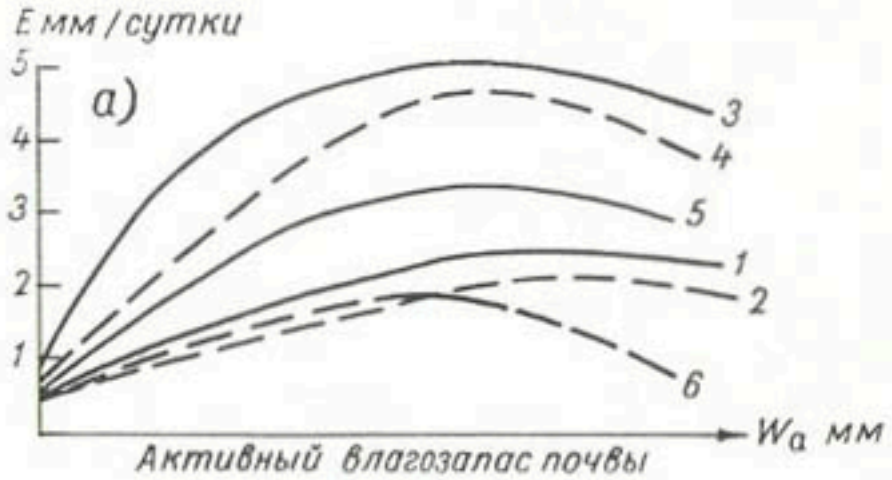
Испаряемость по стандартным метеоданным получают с помощью аналогичных зависимостей, при построении которых в качестве испаряемости используют значение суммарного испарения массива с мощным травостоем (например, луг) в период активной вегетации. Это определение не вполне удобно, так как активная вегетация может происходить в течение ограниченного периода, в то время как испаряемость необходимо определять в любой заданный момент.

При построении биологических кривых рекомендуется приводить испарение к стандартным условиям (средним многолетним):

$$E_{\overline{E}_0} = \frac{\overline{E}_0}{E_0} E; \qquad \text{(III.50)}$$

здесь $E_{\overline{E}_0}$ — приведенное испарение, E — фактическое испарение в данный момент, $\overline{E}_0$ — среднее многолетнее значение испаряемости (табличные данные для данного района), E_0 — фактическое значение испаряемости в данный момент.

После определения приведенного испарения исследуют зависимость $E_{\frac{}{E_0}}$ от активного влагозапаса почвы $W_a = W - W_з$ (W — текущее значение влажности почвы, $W_з$ — влажность устойчивого завядания для разных фаз развития растений). По максимуму функции $E_{\frac{}{E_0}} = f(W_a)$ определяют оптимальную влажность почвы и значения испарения при оптимальной влажности. По этим данным и строят биологическую кривую в координатах: оптимальное испарение — фаза развития (или календарная дата). Пример подобных биологических кривых приведен на рис. 62. Управление поливом может производиться по разности приведенных значений



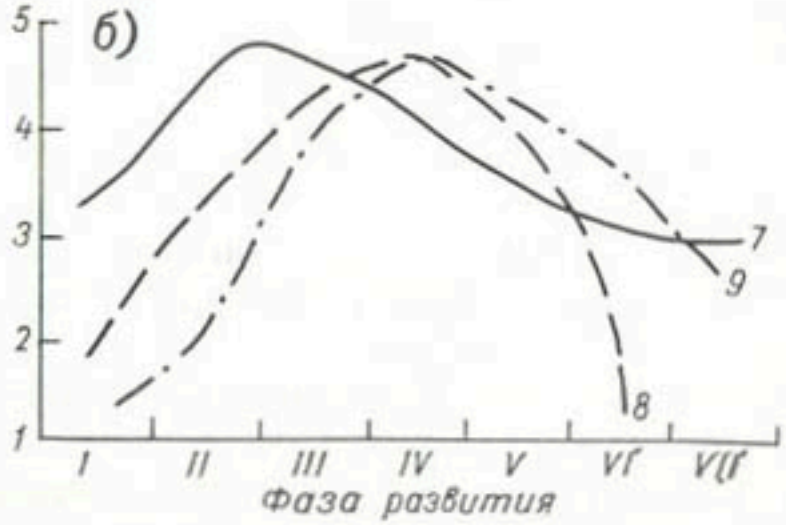


Рис. 62. Изменение испарения в зависимости от влагозапаса активного слоя почвы (*а*) и биологические кривые оптимального водопотребления (*б*).

1, 3, 5, 7 — яровая пшеница; *2, 4, 6, 8* — кукуруза; *9* — озимая пшеница. *1—2* — всходы, *3—4* — цветение, *5—6* — восковая спелость; *I* — всходы, *II* — колошение (для кукурузы — 7-й лист), *III—IV* — выход в трубку (выметывание султана), *V* — цветение, *VI* — молочная спелость, *VII* — полная спелость.

испарения: фактического и нормы, в соответствии с биологической кривой.

В последние годы было предложено много вариантов комплексных критериев влагообеспеченности сельскохозяйственного поля [3, 28, 29]. Наиболее перспективным из них представляется комплексный параметр в виде отношения суммарного испарения к испаряемости $\beta = E/E_0$. Подобные критерии рассматривались уже давно. В частности, в работах А. М. Алпатьева и А. И. Будаговского суммарное испарение нормировалось по испаряемости. При этом, как правило, величина испаряемости бралась по эмпирическим данным или по недостаточно надежным измерениям, а потому часто бывали случаи, когда испарение оказывалось больше испаряемости, что противоречит смыслу формулировки самого определения этих параметров.

Все упоминавшиеся показатели (расчетная «испаряемость», дефицит влажности воздуха, радиационный баланс) функционально связаны с истинной испаряемостью, но формы этой связи достаточно сложны. Их нельзя сводить к простой пропорциональности, так как испаряемость — функция многих взаимосвязанных параметров, весьма важная часть которых исключается из рассмотрения при использовании подобных простейших комплексов.

Предложенный параметр β удобен тем, что при правильном определении испаряемости в соответствии с энергетической трактовкой влияние метеорологических факторов исключается полностью. Все метеорологические факторы (радиация, ветер, температура, влажность воздуха и т. п.) одинаково влияют на изменение и испарения, и испаряемости, так как по существу различие между этими параметрами может быть сведено только к разнице в степени влагообеспеченности растительного покрова. Естественно предполагать, что интенсивность поступления воды к испаряющим элементам в растительном покрове не может существенно воздействовать на турбулентный механизм обмена влагой в приземном слое атмосферы.

По смыслу этого параметра естественные пределы изменения β от нуля до единицы. Значение отношения испарения к испаряемости больше единицы не имеет физического смысла, и появление таких значений при практических измерениях и расчетах свидетельствует о неправильном подходе к определению испаряемости.

Учитывая сказанное выше о допустимых вариациях транспирации и о доле транспирации в суммарном испарении, нетрудно предсказать, что в условиях оптимальной влагообеспеченности растений изменения β будут невелики (это подтверждается и экспериментальными данными).

Следует еще раз подчеркнуть отличие рассматриваемого параметра от использовавшихся ранее относительных показателей. Здесь под E_0 понимается такое значение испарения, при котором вся приходящая к деятельной поверхности энергия расходуется на парообразование при условии оптимальной влагообеспеченности поля. Последнее требование является обязательным, так как при избытке влаги в почве испарение уменьшается из-за угнетения физиологических процессов в растениях.

Параметр β иногда называют также коэффициентом влагообеспеченности сельскохозяйственного поля. При условии, что E_0 соответствует суммарной энергии, которая поступает к растительному покрову и может быть затрачена на испарение, величина β показывает, какая доля этой энергии фактически затрачена на испарение влаги. Сезонный ход β является одной из форм представления биологических кривых, так как необходимое значение β может меняться из-за различий в потребности во влаге у растений на разных фазах развития. Эти различия обусловливаются изменениями оптимальной температуры органов растений, факторами

интенсивности минерального питания и т. п. Все эти факторы приводят в действие регуляторные механизмы растения и управляют влагооборотом. Приведенные на рис. 61 биологические кривые и изменение оптимальной влажности почвы на разных фазах развития, показанное на рис. 62, говорят о наличии подобных зависимостей β от фазы развития растений.

Для определения коэффициента влагообеспеченности сельскохозяйственного поля необходимы данные по суммарному испарению и испаряемости. Испарение может быть определено любым из перечисленных выше методов.

Для районов и периодов времени, в которых дневная инверсия температуры не наблюдается, в качестве значения испаряемости E_0 можно, как это предлагал Ю. Л. Розеншток [25], исполь-

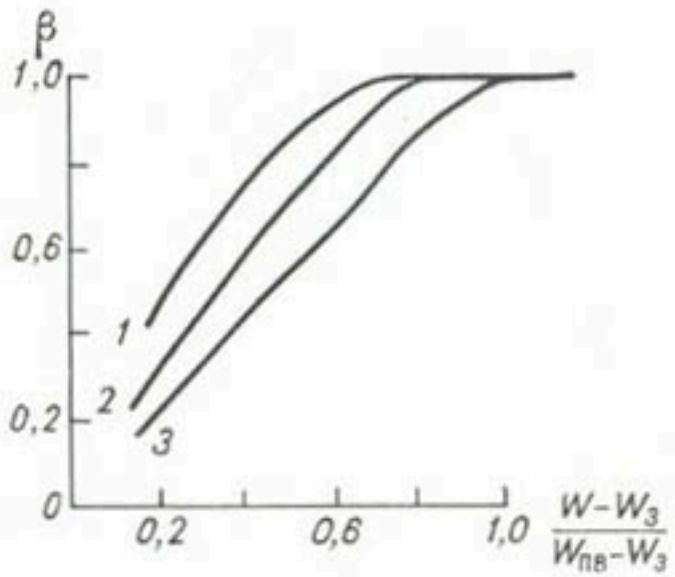


Рис. 63. Зависимость коэффициента влагообеспеченности $\beta=E/E_0$ от количества доступной растению влаги.

$1 - E_0$=0,1 мм/час, $2 - E_0$=0,5 мм/час, $3 - E_0$=0,9 мм/час. Пшеница, Кулундинская степь.

зовать параметр $(R-B)$. Тогда значение β относительно просто определится по методу теплового баланса из (III.16):

$$\beta \approx \frac{\Delta e}{\Delta e + a\,\Delta T}. \qquad \text{(III.51)}$$

При наличии инверсионного режима, в частности для районов, характеризующихся устойчивым оазисным эффектом, требуется специальное определение испаряемости. Как правило, для этих районов типичне наличие длительных периодов ясной погоды без осадков с высокой степенью повторяемости условий от года к году. Поэтому для случаев такого рода в основном можно использовать средние многолетние данные годового хода испаряемости или прибегать к расчету испаряемости по эмпирическим формулам для данной зоны, учитывающим не только воздействие метеорологических факторов на испаряемость, но и влияние растительного покрова (например, листового индекса).

Общие соображения, а также структура формулы (III.51) позволяют предполагать, что β является относительно устойчивым параметром со слабовыраженным суточным ходом. При использовании этого параметра из анализа должны исключаться периоды перемены знака потока влаги (конденсации пара), так как в этих

условиях становится неверной сама модель, принятая при определении коэффициента влагообеспеченности поля по (III.51). Факт малых изменений β в течение светлого времени суток подтвержден экспериментально.

Теоретические расчеты и эксперимент указывают на наличие связи коэффициента влагообеспеченности β с влажностью почвы. В качестве примера можно привести подобные характеристики для пшеницы (рис. 63) и хлопчатника (рис. 64). Общий ход этой характеристики подтвержден многими исследователями.

Для влажности $W_з$ устойчивого завядания $\beta=0$. Хотя в литературе имеются данные о том, что при $W<W_з$ растение способно поглощать влагу из почвы и транспирация в этих условиях будет продолжаться, остаточная транспирация будет очень мала и $\beta\approx0$.

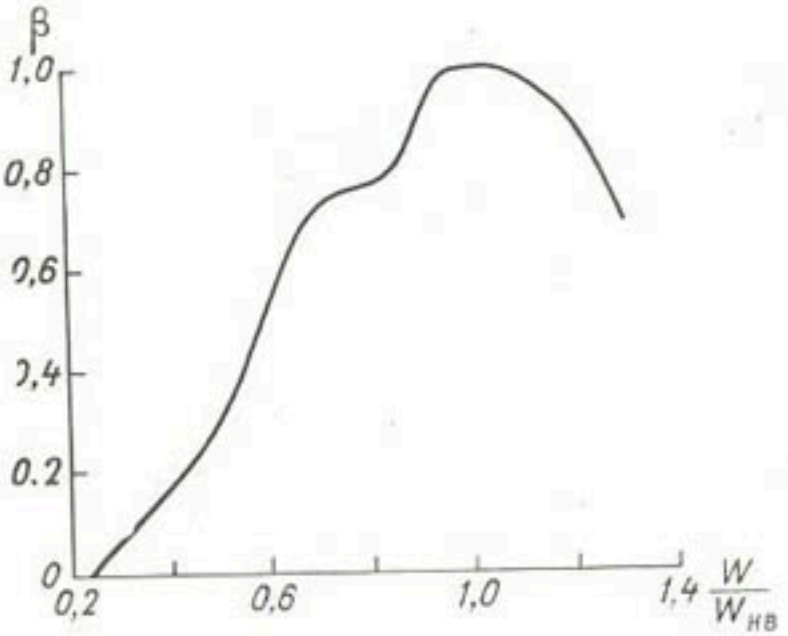


Рис. 64. Зависимость коэффициента влагообеспеченности $\beta=E/E_0$ от влажности почвы. Хлопчатник, Ашхабад.

Далее, при росте влажности почвы от $W_з$ до некоторой критической влажности $W_{кр}$ отмечается рост β, происходящий практически по линейному закону. Исключение составляют зоны вблизи указанных граничных точек $W_з$ и $W_{кр}$, где изменение β относительно плавно переходит к изменению по другому закону. Область линейного изменения β представляет наибольший интерес, как и область перехода к $\beta=1$, так как оптимальные условия для растений достигаются вблизи $W_{кр}$.

Все, кто занимался определением β и построением подобных характеристик, отмечают значительный разброс точек относительно средней кривой [29, 36]. А. И. Будаговский при теоретическом анализе подобной зависимости [3] указал на одну из возможных причин этого разброса — вариацию коэффициента обмена. В некоторых других работах были попытки связать этот разброс с изменением величины радиационного баланса, что по существу указывает на нелинейность и неоднозначность зависимости $\beta=f(W, E_0)$. На возможность такой связи указывал и А. И. Будаговский.

М. Г. Саноян [29] построил семейство кривых $\beta(W, E_0)$ и выявил зависимость $W_{кр}=f(E_0)$. Этот результат в общем не противоречит концепции о возможных причинах такой связи, так как сама испаряемость также является функцией коэффициента обмена. Такой подход позволяет прямо связать влажность почвы с метеорологическими параметрами. По экспериментальным дан-

ным, для орошаемой пшеницы (Кулундинская степь) эта зависимость получена в виде

$$W_{кр} = b + CE_0. \qquad \text{(III.52)}$$

Для каждого значения $E_0^{(n)}$ по графику рис. 63 $W = a\beta$, откуда $a = W_{кр}^{(n)}$. При режиме конвекции в отсутствии оазисного эффекта $E_0 = R - B$, а β определяется по (III.51). Из этих соотношений можно получить формулу, связывающую влажность почвы с другими агрометеорологическими параметрами приземного слоя:

$$W = \frac{\Delta e\,[b + C\,(R - B)]}{\Delta e + 0{,}64\Delta T} \cdot 100\% \qquad \text{(III.53)}$$

Этот метод до сих пор не распространился, так как график вида (III.53) получен однократно и нет данных о пригодности его для других культур и климатических зон.

Зависимость $\beta(W)$ (рис. 64) для хлопчатника [5] отличается от большинства подобных экспериментальных материалов относительно малым разбросом точек, что, возможно, связано с явно выраженным оазисным эффектом. Возможно, что в условиях дневной инверсии стабилизируются коэффициенты обмена в слое, непосредственно прилегающем к поверхности растительности. Значения испаряемости, необходимые для определения β, в данном случае были получены путем интерполяции по точкам, соответствующим испарению поля непосредственно после полива при влажности почвы около 95% полевой влагоемкости (ПВ).

В этом эксперименте в полевых условиях были получены данные для случая избыточного увлажнения. Ход зависимости $\beta(W)$ показывает, что при $W \geqslant$ ПВ наблюдается уменьшение β, соответствующее ослаблению транспирации из-за нарушения функций растений при вымокании корневой системы. Отмечается также изменение крутизны характеристики в области, близкой к влажности разрыва капилляров. Эта зона соответствует $\beta \approx 0{,}7$ и $W \approx \approx 0{,}7$ ПВ, что согласуется с данными о предполагаемом диапазоне изменений $\beta \approx 0{,}7 \div 1$ для оптимальных режимов развития растений.

Хотя рассматриваемые характеристики для хлопчатника получены в результате трехлетних экспериментов и для данного района могут считаться достаточно обоснованными, возможность их использования в других районах и на других культурах требует дополнительной проверки.

Заключая этот раздел, необходимо отметить, что комплексные параметры типа коэффициента влагообеспеченности сельскохозяйственного поля представляют известный интерес при обосновании выбора режимов водоснабжения, а также для оперативного управления поливами. Сроки полива определяются при непосредственном измерении β. Полив необходимо назначать, когда β уменьшится до β_{min}. Значение β_{min} меняется в зависимости от фазы развития

растений (при поддержании оптимального режима влагообеспеченности поля), но абсолютный минимум при этом фиксирован ($\beta_{min} \geqslant 0{,}7$). Норма полива вычисляется по графику $\beta = f(W)$, представленному на рис. 64

С точки зрения организации оптимального режима выращивания растений следует различать две предельные точки рабочей части графика. Одна из них соответствует началу замедления роста при недостатке влаги ($\beta_{min} \approx 0{,}7$; $W = W_1$). Вторая точка ($\beta = 1$, $W = W^{(2)}_{кр}$) соответствует нарушению физиологических функций растения при избытке влаги. При дальнейшем увеличении количества влаги в почве суммарное испарение и β уменьшаются, а затем стабилизируются при значении β, соответствующем испарению с поверхности воды, экранированной растительным покровом. В этом случае сами растения испаряют мало влаги, но вызывают заметное уменьшение коэффициента обмена для поверхности воды.

В зависимости от ресурсов воды, опасностей засоления за счет подъема грунтовых вод, возможностей организации более или менее частых поливов норма полива может рассчитываться, исходя из изменения влажности почвы от W_1 до $W^{(1)}_{кр}$ или до $W^{(2)}_{кр}$. В первом случае норма полива уменьшена при сокращенном межполивном интервале, во втором случае интервал и норма полива увеличены, но есть опасность потери части воды за счет инфильтрации, а также возможно повышение концентрации солей.

При определении норм полива с помощью коэффициента влагообеспеченности поля следует иметь в виду, что в качестве параметра влажности почвы в данном случае используется полный влагозапас корнеобитаемого слоя и оросительная норма определяется с учетом хода изменений глубины этого слоя. Важное достоинство применения метода оценки влагообеспеченности по β в том, что отпадает необходимость измерения влажности почвы и сложной обработки данных, так как по существу значение β может быть рассчитано по градиентным измерениям в одной точке поля.

Использование коэффициента влагообеспеченности поля в качестве критерия полива дает возможность автоматически управлять поливом, хотя до последнего времени этот метод еще не вышел из рамок специальных исследований.

В настоящее время из расчетных методов оценки влагообеспеченности наиболее широко применяется метод водного баланса. Распространены две модификации расчетной схемы: оценка влагозапаса по суммарному испарению и осадкам, а также непосредственное определение влагозапаса по данным почвенных испарителей. В обоих случаях для расчета запаса продуктивной влаги и норм полива необходимо до начала воднобалансовых измерений определить исходную влажность почвы (или почвенного монолита испарителя) и оптимальный интервал влажности почвы.

Таблица 19

Сводная таблица гидрометеорологических методов оценки влагообеспеченности поля

Метод или показатель	Характеристика метода	Область применения	Эксплуатационная характеристика	
			достоинства	недостатки
Определение суммарного испарения методом турбулентной диффузии	Полевой	Исследования фотосинтеза, оценки влагообеспеченности поля	Возможность автоматизации измерений. Малая изменчивость показателя для больших площадок	Косвенный метод оценки влагообеспеченности поля. Малая точность из-за несовершенства определения коэффициента обмена. Значительный объем вычислений
Определение суммарного испарения методом теплового баланса	Полевой	Исследования фотосинтеза, оценки влагообеспеченности поля	Возможность автоматизации измерений и вычислений. Малая изменчивость показателя для больших площадок	Косвенный метод оценки влагообеспеченности поля. Большие ошибки в определении испарения для переходных периодов и ночного времени. Метод неточен при наличии местной адвекции. Сложность и высокая стоимость автоматической аппаратуры

Метод или показатель	Характеристика метода	Область применения	Эксплуатационная характеристика	
			достоинства	недостатки
Определение суммарного испарения пульсационным методом	Полевой	Исследования фотосинтеза, оценка влагообеспеченности поля	Возможность автоматизации изменений и вычислений. Малая изменчивость показателя для больших площадок. Принципиальная пригодность метода для измерений в условиях местной адвекции	Косвенный метод оценки влагообеспеченности поля. Сложность и высокая стоимость автоматической аппаратуры
Определение суммарного испарения методом водного баланса	Полевой	Оценка влагообеспеченности поля	Малая изменчивость показателя для больших площадок. Простота измерений и используемой аппаратуры	Низкая точность определения испарения для небольших интервалов времени (до 5—7 дней) Трудность механизации и автоматизации измерений. Косвенный метод оценки влагообеспеченности поля
Определение элементов водного баланса (суммарного испарений, влагосодержания почвы) с помощью специальной воднобалансовой аппаратуры	Полевой	Оценки влагообеспеченности поля. Исследования влаги в почве	Простота измерений. Возможность определения сложных показателей типа испаряемости	Значительные ошибки измерений за счет изоляции модельного блока почвы. Трудность экстраполяции параметров, измеренных в установке, на все поле

Метод или показатель	Характеристика метода	Область применения	Эксплуатационная характеристика	
			достоинства	недостатки
Определение суммарного испарения и испаряемости по эмпирическим уравнениям	Расчетный	Прогноз и оценка влагообеспеченности поля	Возможность применения стандартных метеоданных. Возможность расчета показателей для больших районов	Малая точность расчета. Невозможность расчета показателей для небольших интервалов времени. Ограничение в использовании формул для разных климатических зон и различных культур
Оценка интенсивности фотосинтеза по потоку углекислого газа	Полевой	Исследования фотосинтеза. Оценка влагообеспеченности поля	Возможность автоматизации измерений и вычислений. Оценка влагообеспеченности поля непосредственно по фотосинтетическим показателям	Ошибка измерений за счет точности метода определения коэффициента турбулентного обмена. Сложность и высокая стоимость аппаратуры
Оценка влагообеспеченности поля по комплексным гидрометеорологическим показателям	Полевой	Прогноз и оценка влагообеспеченности поля	Возможность автоматизации измерений и вычислений. Простота определения параметра. Малая изменчивость показателя для больших площадок	Необходимость определения испаряемости. Ограничения в использовании простых экспериментальных методов для случая инверсии температуры

Расчеты такого рода возможны в случаях, когда допустимы упрощения основной формулы водного баланса (для почвенных испарителей это соответствует условию отсутствия подпитки активного слоя почвы из зоны грунтовых вод). При этом по исходной влажности и оптимальному влагосодержанию рассчитываются допустимые пределы веса почвенного монолита. Снижение веса испарителя за норму свидетельствует о необходимости полива. Норма подачи воды может быть рассчитана по тем же данным.

При оценке влагообеспеченности поля по суммарному испарению также применяются упрощенные формулы водного баланса, из которых вытекают и необходимые ограничения в применении подобных методов. В основном это сводится к требованиям пренебрежимо малых потоков влаги из зоны грунтовых вод и малой инфильтрации за пределы корнеобитаемого слоя. Упрощенная формула водного баланса

$$B = B_0 + O - E, \qquad \text{(III.54)}$$

где B и B_0 — фактический и начальный влагозапас, E — суммарное испарение, O — осадки.

Обычно измерение осадков и начального влагозапаса почвы производят по стандартным методам. Наиболее сложно измерение суммарного испарения, для которого могут применяться любые из рассмотренных выше методов. Чаще всего для этой цели используется наиболее просто реализуемый метод теплового баланса. В некоторых случаях (при стабильных метеорологических условиях) приближенная оценка суммарного испарения может быть сделана по величине радиационного баланса и соотношению Боуэна (III.5), определяющему по существу распределение энергии, приходящей к деятельной поверхности.

Воднобалансовые методы требуют проведения больших расчетных работ и по существу не обеспечены измерителями и вычислителями, которые позволили бы широко использовать их для управления поливом, хотя современный уровень специального приборостроения такую возможность открывает.

Особенность воднобалансовых методов в том, что они способны обеспечить необходимую точность при значительных интервалах времени — от нескольких дней и более. При проведении специальных исследований подобные методы применяются достаточно широко.

Так же как и в предыдущих главах, основные характеристики рассмотренных выше расчетных методов определения различных параметров влагообеспеченности сельскохозяйственного поля приведены в табл. 19.

ЛИТЕРАТУРА

1. Алпатьев А. М. Влагооборот культурных растений. Гидрометеоиздат, Л., 1954.

2. Биологические основы орошаемого земледелия. Сб. статей. Изд. «Наука», М., 1964.

3. Будаговский А. И. Испарение почвенной влаги. Изд. «Наука», М., 1964.

4. Будыко М. И. Тепловой баланс земной поверхности. Гидрометеоиздат, Л., 1956.

5. Гафуров В. К. Комплексное исследование элементов теплового и водного балансов орошаемого хлопкового поля в зоне Каракумского канала им. В. И. Ленина. Автореферат диссертации. Л., 1969.

6. Гейгер Р. Климат приземного слоя воздуха. Пер. с англ. под ред. С. А. Сапожниковой. ИЛ, М., 1960.

7. Гиршович Ю. Е., Чудновский А. Ф. Комплексное определение и регистрация турбулентных потоков углекислого газа, тепла и влаги в приземном слое воздуха. Тр. АФИ, вып. 16, 1968.

8. Иванов Н. Н. Об определении величин испаряемости. Изв. Всес. геогр. общ., т. 86, № 2, 1954.

9. Исследования процессов обмена энергией и веществом в системе почва — растение — приземный воздух. Сб. статей. Изд. «Наука», М., 1971.

10. Климатология и микроклиматология. Пер. с англ. под ред. В. С. Самойленко. Изд. «Прогресс», М., 1964.

11. Константинов А. Р. Испарение в природе. Гидрометеоиздат, Л., 1968.

12. Костяков А. Н. Основы мелиораций. Сельхозгиз, М., 1960.

13. Лайхтман Д. Л., Чудновский А. Ф. Физика приземного слоя атмосферы. Гостехиздат, М.—Л., 1949.

14. Лайхтман Д. Л. Физика пограничного слоя атмосферы. Гидрометеоиздат, Л., 1961.

15. Материалы Междуведомственного совещания по проблеме изучения и регулирования испарения с водной поверхности и почвы. ГГИ, Валдай, 1964.

16. Методические указания управлениям Гидрометслужбы, № 17. Постановка градиентных наблюдений за температурой, влажностью воздуха и скоростью ветра на озерных станциях. Гидрометеоиздат, Л., 1960.

17. Монин А. С., Яглом А. М. Статистическая гидромеханика, ч. I. Изд. «Наука», М., 1965.

18. Мурсаев А. Х., Мушкин И. Г., Петров Б. К., Смолов В. Б., Угрюмов Е. П. Цифроаналоговый вычислитель для определения составляющих теплового баланса подстилающей поверхности и некоторых параметров влагообеспеченности сельскохозяйственного поля. Изв. ЛЭТИ им. В. И. Ульянова (Ленина), вып. 65, ч. II. Л., 1967.

19. Мушкин И. Г., Песчанский Ю. А., Саноян М. Г. О трансформированной погрешности и динамическом диапазоне расчетной схемы метода теплового баланса. Тр. АФИ, вып. 26, 1970.

20. Пенман Х. Л. Растения и влага. Пер. с англ. под ред. А. М. Алпатьева. Гидрометеоиздат, Л., 1968.

21. Попов О. В. Применение гидравлического почвенного испарителя в зоне недостаточного увлажнения. Тр. ГГИ, вып. 57 (111), 1956.

22. Пушкарев В. Ф. Приборы и методы измерения испарения с сельскохозяйственных полей. Матер. конфер. по агрометеорол. и агроклиматол. УССР. Гидрометеоиздат, Л., 1958.

23. Пушкарев В. Ф. Исследование методов наблюдений над испарением с почвы. Тр. ГГИ, вып. 45, 1954.

24. Розеншток Ю. Л. Автоматическое устройство для измерения и регистрации коэффициента обмена и турбулентных потоков тепла и влаги. Метеорология и гидрология, № 8, 1961.

25. Розеншток Ю. Л. О возможности непосредственного определения некоторых связей между составляющими теплового баланса подстилающей поверхности. Тр. АФИ, вып. 10, 1962.

26. Руководство по производству наблюдений над испарением с сельскохозяйственных полей, ч. I и II. Гидрометеоиздат, Л., 1957.

27. Руководство по градиентным наблюдениям и определению составляющих теплового баланса (ГГО). Гидрометеоиздат, Л., 1964.

28. Савина С. С. Гидрометеорологический показатель засухи и его распределение на территории Европейской части СССР. Изд. АН СССР, М., 1963.
29. Саноян М. Г. Исследование некоторых гидрометеорологических характеристик почвы и приземного слоя воздуха с помощью аналоговых вычислительных устройств. Автореферат диссертации. Л., 1966.
30. Сапожникова С. А. Микроклимат и местный климат. Гидрометеоиздат, Л., 1950.
31. Сеттон О. Г. Микрометеорология. Пер. с англ. под ред. Д. Л. Лайхтмана. Гидрометеоиздат, Л., 1958.
32. Скворцов А. А. Орошение сельскохозяйственных полей и микроклимат. Гидрометеоиздат, Л., 1964.
33. Слейтер Р., Макилрой И. Практическая микрометеорология. Пер. с англ. под ред. С. А. Вериго и С. А. Сапожниковой. Гидрометеоиздат, Л., 1964.
34. Стеризат М. С., Сапожников А. А. Метеорологические приборы, наблюдения и их обработка. Гидрометеоиздат, Л., 1959.
35. Субботин А. С. Обзор лизиметров и основные требования к их конструкциям. Тр. ГГИ, вып. 92, 1964.
36. Турапов И. Микроклимат и некоторые закономерности испарения с хлопкового поля. Автореферат диссертации. Л., 1968.
37. Урываев В. А. Экспериментальные гидрологические исследования на Валдае. Гидрометеоиздат, Л., 1953.
38. Физика среды обитания растений. Сб. статей. Пер. с англ. под ред. А. М. Глобуса. Гидрометеоиздат, Л., 1968.
39. Харченко С. И. Гидрология орошаемых земель. Гидрометеоиздат, Л., 1968.
40. Харченко С. И. Воднобалансовые исследования на орошаемых землях. Гидрометеоиздат, Л., 1967.
41. Чудновский А. Ф., Мушкин И. Г., Каганов М. А., Гиршович Ю. Е. Методы и приборы, применяемые для исследований в орошаемом земледелии. Материалы объединенной сессии ВАСХНИЛ и АН УзССР по вопросам мелиорации. Изд. ФАН УзССР, Ташкент, 1967.
42. Чудновский А. Ф., Шлимович Б. М. Полупроводники, радиоэлектроника и кибернетика в агрометеорологии. Гидрометеоиздат, Л., 1966.
43. Электронные приборы для агрофизических исследований. Тр. АФИ, вып. 25, 1970.
44. The collection and pocessing of field data. A CSIRO Simposium, 1966.
45. Maher F. I. The Evapotron — an Electronic Instrument for measuring Evaporation from Natural Surface. Proc. IREE Austral., okt. 1965.
46. Mc. Gaviu R. E., Vetter M. J. Radio Refractometry and its Potential for Humidity Stadies. "Humidity and moisture", v. III, p. 553—560, 1964.
47. Monteith J. L. Measurement and interpretation of carbon dioxid fluxes in field. Neter. J. Aqric. Sci., 10 (5), 1952.
48. Penman H. L. Evaporation. An Introductory Survey. Neter. J. Aqric. Sci., 4, 1956.

Глава IV

РЕПРЕЗЕНТАТИВНОСТЬ ОЦЕНОК ВЛАГООБЕСПЕЧЕННОСТИ

§ 1. Репрезентативность во времени и в пространстве

Многообразие условий микроклимата в приземном слое атмосферы связано с особенностями микрорельефа поверхности, наличием турбулентных пульсаций в потоках воздуха и пестротой свойств почвы. Все это обусловливает большой разброс индивидуальных значений параметров, измеряемых в почве и особенно в приземном слое воздуха. В связи с этим при измерении агрометеорологических показателей возникает проблема получения репрезентативных данных, т. е. типичных для какого-то участка или района.

Результаты метеорологических наблюдений считаются репрезентативными в пространстве, если они остаются верными в пределах заданной точности для любой точки рассматриваемой области в определенный момент времени. Они будут репрезентативными во времени в том случае, когда останутся верными для любого момента заданного отрезка времени в определенной точке пространства.

Если измеренное значение какого-либо метеопараметра в данный момент времени необходимо отождествить со средним значением по площади, то, говоря о репрезентативности отдельного измерения (или серии измерений), обычно сравнивают результаты этого измерения со средним значением параметра. Мерой репрезентативности является дисперсия, которая в идеальном случае должна соответствовать погрешности измерений (или быть меньше).

Аналогично и репрезентативность во времени оценивается при сравнении мгновенного значения параметра в данной точке со средним значением его в этой точке за весь заданный отрезок времени.

В практически важных случаях, как правило, приходится добиваться получения данных, репрезентативных и по площади, и во времени, что, конечно, существенно затрудняет решение проблемы измерений, так как методы должны отвечать одновременно широкому комплексу требований.

Естественно, что, чем больше площадь осреднения или интервал времени, тем бóльшие будут отклонения и тем хуже будут показатели репрезентативности, поскольку на больших площадях более вероятны значительные отклонения параметров среды от значений в данной случайной точке. Исключениями могут быть чрезвычайно редкие площадки, абсолютно однородные по рельефу, растительности, обработке. Поэтому если задана точность определения метеопараметра, то тем самым как бы фиксирован верхний предел размера участка, для которого измерения в точке могут быть репрезентативными при нормальном пространственном разбросе параметров и случайном распределении по площади отклонений от среднего.

Несколько отличное от рассмотренного представляет собой положение с временным ходом параметров. Здесь не всегда можно говорить о случайном разбросе параметров. Временной ход метеорологического параметра в приземной атмосфере может быть представлен как сумма пульсаций различной амплитуды и частоты. Анализируя распределение энергии в турбулентном спектре, нетрудно обнаружить несколько характерных максимумов. Это значит, что не все частоты в спектре равновероятны. Пульсациям, связанным с турбулентной структурой потока, соответствуют частоты в полосе от десятков до тысячных долей герца. Помимо суточного максимума с периодом 24 часа, в спектре различаются четкие максимумы с периодом около 4—6 суток, около года и т. д. Полный спектр должен отражать наличие колебаний солнечной активности (с периодами от десятков до тысяч лет). В зависимости от целей исследования искомым может быть мгновенное значение параметра или его ход в различные интервалы времени. Соответственно изменяются и значения репрезентативности. В интересующем нас участке спектра амплитуда низкочастотных (суточных) колебаний значительно превышает амплитуду высокочастотных (турбулентных). При этом единичный отсчет всегда менее репрезентативен по отношению к суточному ходу, чем среднесуточное значение по отношению к среднему за больший промежуток времени.

Представляя мгновенное значение метеопараметра в форме

$$X = \overline{X} + X', \qquad \text{(IV.1)}$$

где $\overline{X}$ — математическое ожидание, а X' — отклонение от него, несложно показать, что по существу репрезентативным является математическое ожидание $\overline{X}$, а основной путь повышения репрезентативности наблюдений — осреднение единичных отсчетов. Этот вывод можно сделать как для репрезентативности во времени, так и для репрезентативности в пространстве.

Возвращаясь к вопросу о временной репрезентативности, отметим, что вследствие наличия в спектре областей частот, которым соответствуют минимумы энергии колебаний, возможна постановка

задачи, сводящаяся к выбору оптимального периода осреднения. Под оптимальным понимается такой минимальный период осреднения, который позволяет воспроизвести с минимальной ошибкой низкочастотные изменения параметров для данного отрезка времени и наиболее эффективно подавить высокочастотные колебания. Решение подобных задач (оптимальной фильтрации сигнала) применительно к метеорологическим параметрам весьма сложно. До сих пор такие задачи решались в основном эмпирически для нескольких типичных случаев.

Наиболее строго эта задача поставлена в работе [22][1], в которой получены основные соотношения, позволяющие оценить по дисперсии сигнала репрезентативность метеоданных во времени или в пространстве. Произведенный в ней анализ затрагивает проблемы репрезентативного размещения метеостанций, а также системы обработки данных.

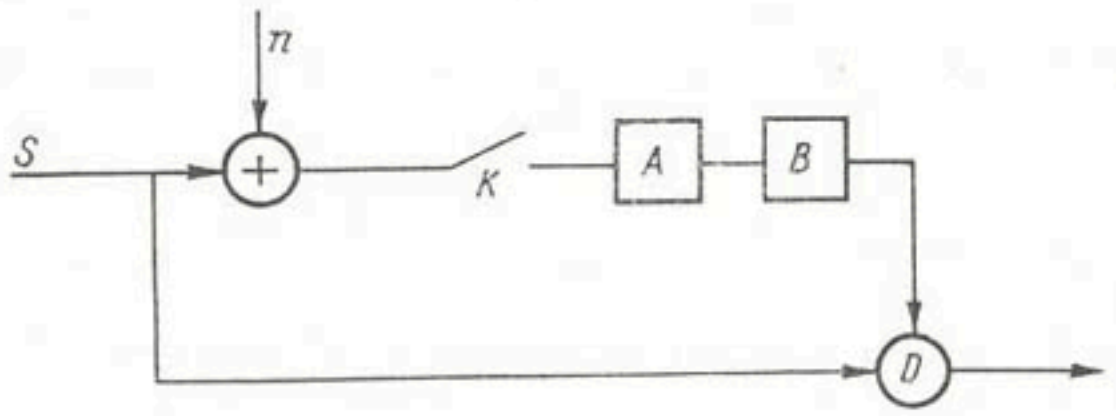


Рис. 65. Структурная схема обработки сигнала.

В работе используется структурная схема, показанная на рис. 65. Здесь S — полезный сигнал; n — сигнал шума, в который, помимо помех, могут быть включены и составляющие метеопараметров, различающиеся по частоте от полезного сигнала (высокочастотные компоненты); K — элемент системы, задающий квантование (во времени или в пространстве). Характеристикой этого элемента является интервал времени между измерениями или расстояние между станциями. Блок A обеспечивает скользящее осреднение данных и получение математического ожидания параметра; блок B осуществляет восстановление сигнала в интервалах квантования (между двумя соседними измерениями); D — элемент сравнения, определяющий дисперсию восстановленного сигнала по отношению к заданному истинному.

Авторы работы [22] составили уравнения, реализующие данную схему, и сформулировали основные требования к блокам A, B и K, которые обеспечили бы получение минимума дисперсии на выходе системы. Полученные соотношения они анализируют для конкретных условий, так как точное решение реализовать не удалось.

---

[1] Объединенный список литературы к главам IV и V помещен после главы V.

Для некоторых конкретных метеопараметров и систем обработки теоретические работы по репрезентативности выполнены в ГГО, в АФИ и в других организациях [8, 21].

В практической формулировке задачи репрезентативности могут быть рассмотрены два варианта: выбор интервала осреднения при фиксированном числе измерений или выбор числа отсчетов при фиксированном интервале времени.

Если не рассматривать крупномасштабных синоптических процессов, а ограничиться проблемой измерений для небольших однородных площадок, то при определении репрезентативных данных за относительно короткие интервалы времени осреднение по времени будет эквивалентно осреднению по пространству. Это можно наглядно объяснить, прибегая к гипотезе о замороженной турбулентности. При наличии турбулентных вихрей и горизонтального переноса за счет ветра изменение параметра, например температуры, по площади может быть определено по набору мгновенных значений параметра, случайно распределенных в выбранной плоскости. Величины этих мгновенных значений подчиняются закону распределения отклонений от среднего для турбулентной среды. Полагая вихрь симметричным в горизонтальной плоскости, такие измерения можно производить размещая датчики по линии ветра. Но если время существования вихря больше времени измерений, то идентичные данные могут быть получены и с помощью единственного датчика по мере перемещения вихря мимо датчика.

Эквивалентность осреднения по площади и во времени может быть проверена и доказана для статистически достоверных данных, полученных с помощью большого количества безынерционных датчиков.

Репрезентативность единичного отсчета зависит от инерции датчика, за счет которой автоматически осуществляется осреднение параметра в интервале, приблизительно равном постоянной времени датчика.

Амплитуда пульсаций, измеренных инерционным датчиком, уменьшится, и фазовые соотношения исказятся. При исследованиях структуры полей метеорологических элементов это приводит к ошибкам и утрате части необходимой информации за счет интегрирования высокочастотных колебаний. Но во многих практически важных измерениях для обеспечения репрезентативности во времени необходимо дополнительное осреднение по серии отсчетов, так как сглаживания пульсаций за счет инерции датчиков недостаточно.

Вопросы пространственной репрезентативности имеют принципиальное значение при выборе места расположения датчиков измерительного комплекса (или метеостанции), предназначенного для специальных агрометеорологических исследований. Проблемы репрезентативности во времени рассматриваются в основном в связи с выбором методики наблюдений (сроки измерений, осреднение, точность аппаратуры и т. п.).

Результат измерений метеорологического параметра не может расцениваться только с точки зрения технической точности датчика. В зависимости от поставленной цели репрезентативность единичного измерения или серии наблюдений будет различна, а в связи с этим техническая точность может оказаться недостаточной или избыточной. Лучше всего это можно проиллюстрировать на примере измерений температуры. Если репрезентативность измерения пульсирующей температуры по единичному отсчету 0,5°, а точность измерителя 0,3°, то для единичного отсчета точность будет избыточной, так как при воспроизведении временного хода единичный отсчет недостаточно репрезентативен. Если тот же прибор используется для получения средних значений по серии отсчетов, причем методика осреднения может обеспечить репрезентативность 0,1°, то точность датчика может оказаться недостаточной. Аналогично и при осреднении в пространстве. Для приземного слоя атмосферы в режиме развитой турбулентности единичный отсчет температуры с точностью 0,3° может быть репрезентативен в пределах нескольких метров окрестности. При той же точности измерений в инверсионных слоях свободной атмосферы отсчет может быть репрезентативен в пределах нескольких километров.

Все это необходимо иметь в виду и при определении таких сложных агрометеорологических параметров, как степень влагообеспеченности сельскохозяйственного поля. Применительно к этому случаю необходимы несколько иные оценки репрезентативности. Если точно трактовать термин «репрезентативность», то в данном случае, помимо дисперсии параметров во времени и в пространстве, по которой оценивается репрезентативность метеорологических наблюдений вообще, необходимо учитывать и степень соответствия изменений косвенного параметра изменениям истинной влагообеспеченности поля и дисперсию параметра под влиянием побочных воздействий (например, агротехники и минерального питания). В большинстве случаев нет возможности количественно оценить эти характеристики репрезентативности из-за отсутствия достаточно полных данных. Но, несмотря на это, можно ориентировочно определить области наиболее целесообразного использования разных методов, рассматривая последние с точки зрения репрезентативности.

В данном разделе основное внимание уделяется вопросам репрезентативности во времени и в пространстве. Все остальные аспекты проблемы рассматриваются в главах, посвященных обоснованию возможных методов определения влагообеспеченности.

По физическому смыслу такой параметр, как влагообеспеченность, меняется относительно медленно. Если даже он колеблется под действием суточных изменений метеоэлементов, то колебания эти относительно невелики и ограничены узкой полосой частот (с периодом около суток). Отсюда следует, что репрезентативность измерений во времени прямых показателей влагообеспеченности должна быть достаточной даже при единичных отсчетах. Что

касается репрезентативности по площади параметров такого рода, то здесь основную роль играет пестрота условий на поле, и можно считать, что фактический разброс влагообеспеченности достаточно велик, а репрезентативность единичного отсчета явно недостаточна.

В случае косвенных измерений, при которых влагообеспеченность определяется через вспомогательные показатели, основную роль будет играть получение репрезентативных значений самих косвенных параметров, так как их изменчивость во времени и в пространстве, как правило, больше, чем вариации влагообеспеченности. При этом необходимо учитывать также и точность соотношений, связывающих косвенные параметры с влагообеспеченностью.

Кроме того, необходимо во многих случаях учитывать и инерционность процессов тепло- и массообмена в приземном слое атмосферы, обусловливающих взаимосвязь косвенных параметров и влагообеспеченности.

Проблема репрезентативности здесь будет рассмотрена с учетом реальных задач оценки влагообеспеченности. В практической деятельности этот вопрос возникает в вегетационных опытах различного масштаба: в вегетационных сосудах, фитотронах, мелкоделяночных экспериментах. В сельскохозяйственном производстве оценки влагообеспеченности производятся в теплицах и других культивационных сооружениях, на орошаемых полях сельскохозяйственных предприятий и т. д. В зависимости от репрезентативности данных, полученных с помощью того или иного метода, можно определять области наиболее целесообразного применения его и наметить перспективные направления развития измерительной аппаратуры.

В этом смысле можно говорить не только о репрезентативности данных измерений, но и о репрезентативности метода в целом, с точки зрения его пригодности для конкретного случая измерений, и о репрезентативности соотношений, связывающих косвенные параметры с непосредственными показателями влагообеспеченности. Анализ репрезентативности позволит рекомендовать необходимую организацию наблюдений и обработки полученных данных.

§ 2. Репрезентативность и необходимая методика организации наблюдений

Основные биологические методы оценки влагообеспеченности связаны с измерениями на отдельном растении. При этом разброс параметров, по которым оценивается влагообеспеченность, достаточно велик. В данном случае особенно сильное влияние на точность измерений оказывают субъективные факторы и квалификация персонала. Чрезвычайно существенна полная идентичность метода отбора элементов растений и проведения анализов и измерений.

Даже при выполнении всех требований для полевых измерений повторность должна быть большой, поскольку на достаточно пеструю картину собственно влагообеспеченности накладываются слу-

чайные характеристики отдельных опытных растений, связанные с активностью семян, неоднородностью густоты посева и т. п. В литературе нет достаточно полных данных, по которым можно было бы количественно оценить репрезентативность отдельного измерения или среднего значения параметра для серии измерений биологическими методами.

Такие методы, как измерения транспирации, температуры листьев, скорости течения сока в стебле, измерения тургора элементов растения и т. п. по существу не вышли за пределы лабораторий и практически не приспособлены для полевых измерений. При применении подобных методов в поле на больших массивах растительности можно предполагать, по аналогии с другими биологическими методами, что ориентировочная повторность измерений должна быть 30—40 при отборе для опытов среднеразвитых растений (визуальный отбор по внешним признакам) [3].

В полевых экспериментах, относящихся к исследованиям влагообеспеченности, наиболее широко используются методы, связанные с определением сосущей силы листа или концентрации клеточного сока. В большинстве случаев при этом жестко фиксируется срок проведения наблюдений. Чаще всего это интервал 11—13 или 17—19 час. Отбор пробы осуществляется по 8—10 растениям, от каждого из которых берут по одному листу. Повторность проб обычно 6—8. В редких случаях, когда показатели меняются относительно мало, можно снизить повторность до 5. В разные фазы развития растений пробы отбирают из разных ярусов, избегая старых листьев с ослабленным фотосинтезом. Таким образом, при нормальной процедуре может быть определено среднее значение показателя для 60—80 растений, что может обеспечить достаточную достоверность данных при исходном разбросе параметров в пределах 50% номинала и случайном характере отклонений от среднего (Гауссово распределение отклонений).

При оценках интенсивности фотосинтеза по индивидуальным характеристикам растения (например, по приросту стебля или объему зеленой массы) опыт подсказывает необходимость осреднения данных по 40—50 растениям. Как и в предыдущих случаях, для наблюдений отбираются средние по развитию растения. Такое осреднение обеспечивает нивелировку индивидуальных особенностей растений в отношении их развития.

Для оценок влагообеспеченности по динамике роста репрезентативность во времени обеспечивается автоматически из-за малых значений суточного изменения параметра. При этом исключается влияние суточных колебаний метеопараметров, а измерения производятся с интервалом в несколько суток с последующим расчетом среднесуточных значений прироста.

Среди биологических методов наиболее просто решается вопрос репрезентативности при использовании тургорных оценок по завяданию растений. Особенность этого метода состоит в том, что при его реализации нет необходимости в пространственном осреднении,

поскольку производится визуальная оценка завядания для поля в целом. Вопрос репрезентативности во времени для этого метода должен решаться в процессе подготовительных экспериментов, во время которых подбирается наиболее подходящее время наблюдений. Обычно избегают проводить наблюдения в периоды максимума радиационного баланса, так как в это время может иметь место эпизодическое завядание из-за фиктивного дефицита влаги вследствие радиационного перегрева.

Приблизительно такими же характеристиками (с точки зрения репрезентативности) обладает метод измерения объема зеленой массы радиоактивным способом. Пространственное осреднение осуществляется автоматически в пределах базового расстояния аппаратуры (между датчиком и приемником) по ходу излучения, а при перемещении приборов также и по площади. Еще проще решается вопрос репрезентативности во времени: как уже указывалось, объем зеленой массы растет монотонно и единичное измерение достаточно репрезентативно в пределах суток. В таких случаях основная проблема — это определение достаточно надежных и репрезентативных соотношений между влагообеспеченностью и динамикой фотосинтеза. В частности, это относится к определению интенсивности фотосинтеза по объему зеленой массы или по значению потока углекислоты.

Фотосинтез имеет ярко выраженный суточный ход. Если выбрать в течение суток период, когда влагообеспеченность растений является лимитирующим фактором, то в процессе обработки можно исключить влияние остальных факторов питания на интенсивность фотосинтеза.

Как уже указывалось, по влажности почвы наиболее легко и полно оценивается влагообеспеченность растительного покрова (количество доступной влаги в почве). Но при этом степень соответствия собственно влагообеспеченности значениям параметров почвенной влаги может быть различной. Наиболее репрезентативен в этом смысле потенциал влаги в почве или сосущая сила, но они одновременно и наиболее изменчивы, так как связаны в большой мере с особенностями почвенной структуры и составом почвенного раствора.

Несколько менее характерен для влагообеспеченности такой параметр, как объемная влажность, но при наличии данных о гидрологических константах почвы необходимые показатели доступности влаги для растений могут быть легко рассчитаны.

Наименее удобна для оценок влагообеспеченности информация о полном влагосодержании почвы, так как в этом случае необходимо учитывать также и распределение связанной влаги в пределах сельскохозяйственного поля.

С точки зрения изменчивости во времени параметры влагосодержания почвы весьма консервативны. Обычно активный слой, из которого осуществляется питание растений влагой, достаточно велик, и заметные изменения влагосодержания слоя в целом могут

наблюдаться при достаточно редких измерениях (1 раз в 3—4 дня). Но при этом в зонах непосредственного потребления влаги растением, в которых наиболее высока концентрация корневой системы, возможны колебания влажности и в суточном цикле. В дневные часы влага потребляется из почвы, непосредственно примыкающей к корням, а в ночное время идет выравнивание влажности по слою питания.

При почвенных измерениях основную трудность представляет получение данных, репрезентативных в пространстве [17, 19]. Измерители параметров влаги в почве могут быть разбиты по радиусу действий чувствительных элементов на две группы: приборы с точечными датчиками и приборы с объемными датчиками. На показания приборов с точечными датчиками оказывает влияние среда в радиусе действия около 3—5-кратного размера чувствительного элемента. Показания таких приборов по существу равны среднему значению параметра в сфере этого радиуса. Для объемных датчиков радиус сферы действия в 20—50 раз больше размера датчика и соответственно во столько же раз больше объем осреднения.

Наихудшими показателями с точки зрения пространственной репрезентативности обладают методы, в которых необходимые параметры влагообеспеченности определяются в лаборатории по почвенным пробам. Индивидуальные отклонения характеристик при этом будут больше, чем в случае, когда датчик помещен в почвенный монолит и измеряет равновесные значения параметров.

Поскольку пестрота свойств почвы в пределах полевого участка обычно бывает значительной, для получения репрезентативных данных необходима большая повторность проб. По имеющимся данным, в случае взятия почвенных проб для надежных измерений с точностью около 0,1% влажности (при определении разницы во влажности между двумя участками порядка 0,5%) необходимо осреднение данных по 46 пробам. В тех же условиях для более грубых измерений (регистрация разницы во влажности около 2%) достаточно осреднение по пяти пробам. Эти эксперименты проводились в обычных условиях с точки зрения изменчивости почв в пределах опытных участков.

Для оценки точности расчета влагозапасов могут быть привлечены известные формулы вариационной статистики

$$P = \frac{100\sigma}{\overline{W}\sqrt{n}}.$$

Здесь P — вероятная ошибка (в процентах) определения влагозапасов поля, σ — средняя квадратичная погрешность определения влагозапасов в почве (в миллиметрах), n — число повторностей, $\overline{W}$ — среднее арифметическое значение влагозапасов поля (в миллиметрах).

Задавая допустимую ошибку P, можно определить необходимую повторность измерений с учетом реальной изменчивости влажности

почвы на поле. Так, при $\sigma=15$ мм и 80%-ной вероятности $P=10\%$ необходимо иметь $n=6$. Для $\sigma=30$ мм в тех же условиях требуется увеличение повторности измерений до $n=24$.

Анализ фактических данных показывает, что определение влагозапасов (или влажности почвы) с точностью порядка 5% определяемой величины практически недостижимо, так как требуется слишком большая повторность измерений.

Пределы пространственного осреднения радиоактивных методов значительно шире, чем других методов измерения влажности почвы. При реализации γ-метода источник излучения и детектор размещаются в двух шурфах на некотором расстоянии друг от друга. Естественно, что измеряемое влагосодержание автоматически осредняется прибором.

В нейтронной аппаратуре источник и детектор устанавливаются в одном шурфе или в специальном блоке на поверхности почвы, причем объем почвы, активно участвующей в рассеянии нейтронов, зависит от влажности почвы. Получена следующая зависимость для радиуса активной сферы в почве:

$$r=r_{\text{в}}\sqrt[3]{\frac{100}{W}}; \qquad \text{(IV.2)}$$

здесь $r_{\text{в}}$ — радиус сферы в воде, приблизительно равный 17 см при размещении источника в массе и 11,5 см при размещении источника на поверхности почвы.

Фактически при точечных измерениях недостаточно простого осреднения по площади, так как необходим учет влагозапасов во всей зоне питания растений, достигающей иногда (хлопок, кукуруза) глубины 1,5—2 м. Обычно для этого достаточно измерять влажность почвы на 5—7 горизонтах по глубине. Общее количество влаги может быть рассчитано по формуле

$$W=\sum_{i=1}^{n} l_i d_i W_{gi}, \qquad \text{(IV.3)}$$

где n — число горизонтов, на которых производится измерение, l_i — толщина слоя, для которого измеренная весовая влажность почвы W_{gi} и плотность d_i считаются постоянными. Поскольку распределение влаги в почве заведомо нелинейно, значение l_i меняется в зависимости от глубины слоя. В поверхностных слоях и в зоне наибольшей плотности корневой системы, для которых могут наблюдаться значительные колебания влажности в пределах суток (из-за интенсивного отбора влаги на испарение), обычно принимают $l_i=10\div20$ см. На больших глубинах, соответствующих «резервному» влагозапасу, l_i берут равным 30—40 см. В случае когда методика обеспечивает измерение средней влажности для значительного объема, достаточно осреднение по пло-

щади в пределах 5—10 повторностей и по глубине по 1—2 в зависимости от изменчивости почвенных характеристик и глубины корнеобитаемого слоя.

Постановка проблемы репрезентативности при реализации методов теплового и водного баланса во всех формах и модификациях (включая методы определения сложных комплексных показателей) принципиально отличается от всех случаев, упоминавшихся выше [9, 14, 15]. Как правило, эти методы связаны с определением элементов баланса в приземном слое атмосферы и требуют информации о величине коэффициента турбулентного обмена. Для однородной площадки значения коэффициента обмена и потоков тепла и вещества репрезентативны в пределах всей площадки при исключении краевых эффектов, связанных с трансформацией воздушных масс над площадкой у ее границы. Краевые эффекты существенны при наличии значительного контраста смежных участков, и пределы их распространения будут рассмотрены далее. Здесь отметим только, что при значительном контрасте зона трансформации может иметь глубину до 100—150 м. Исходя из этого и из экспериментальных данных, устанавливается минимальный линейный размер участка, для которого выполняются требования репрезентативности. Обычно он составляет около 300—400 м. Следовательно, балансовыми методами могут определяться параметры влагообеспеченности для участков площадью более 10 га, что соответствует ориентировочному размеру поливного поля.

Необходимо подчеркнуть, что указанные размеры участков являются минимально необходимыми в случаях большого контраста условий на смежных площадках, что типично для поливных полей в зоне сухого и жаркого климата. При работах в зоне достаточного увлажнения, особенно в случае когда измерения проводятся на большом массиве, однородном по характеру и развитию растительного покрова, контрастность условий уменьшается и размеры измерительных площадок также могут быть уменьшены без ущерба для точности измерений. Подготовка и организация измерений на малых участках должна включать и специальные исследования точности и репрезентативности планируемых измерений.

Для реализации метода водного баланса в тех случаях, когда имеет место подпитка поверхностного слоя грунтовыми водами или грунтовый сток, минимальный размер площадки может оказаться еще большим.

Таким образом, проблема репрезентативности данных по площади может быть решена относительно просто при правильной организации наблюдений.

Сложнее обеспечить репрезентативность во времени. Как уже указывалось, дискутируется правомерность распространения принципов баланса на малые промежутки времени. Если рассматривать схематически баланс энергии на подстилающей поверхности, то различные элементы процесса могут обладать различной инерцией.

Мгновенное увеличение притока энергии от солнца вызовет мгновенный рост температуры самой поверхности. Если при этом почва не закрыта растительностью, тепловые потоки в почву и воздух, определяемые разностью температур между поверхностью и средой, растут резко. Коэффициент обмена в первый момент остается неизменным, так как состояние атмосферы еще соответствует прошлым условиям. Затем с некоторой инерцией (тепловая постоянная времени τ_1) идет распределение тепла в поверхностном слое почвы и с другой инерцией (постоянная времени τ_2) идет формирование условий в приземном слое воздуха, приводящее к изменению значения коэффициента обмена. Процессы обмена влагой идут с другой инерцией, особенно в тех случаях, когда подстилающей поверхностью является растительный покров и к чисто физическим процессам распределения энергии добавляются биологические механизмы регуляции у растений. Как правило, поверхность почвы подсушена и испарение влаги происходит на некоторой небольшой глубине. Соответственно и увеличение испарения с почвы будет наблюдаться в момент, когда температурная волна от нагрева поверхности достигнет этой глубины и за счет роста упругости насыщающих паров увеличится перепад влажности воздуха между испаряющей зоной и средой. При росте испарения понижается температура сначала в зоне испарения, а затем встречная волна доходит и до поверхности. Таким образом, постепенно устанавливается новый тепловой баланс, соответствующий измененному притоку энергии.

Аналогичные процессы происходят и при формировании условий в приземном слое атмосферы. Разница между почвой и воздухом с точки зрения инерционности процессов определяется большей теплоемкостью почвы по сравнению с воздухом и малыми значениями коэффициентов обмена в почве по сравнению с параметрами турбулентной диффузии.

Подстилающая поверхность является как бы инерционным звеном и сама осуществляет некоторое осреднение процесса, а воздушная среда более точно повторяет ход изменений притока энергии. При измерениях в атмосфере над подстилающей поверхностью из-за различной инерции процессов в почве и воздухе тепловой баланс (как и водный) замыкается только для средних значений параметров. Для мгновенных значений реализация баланса необязательна вследствие наличия фазовых сдвигов.

Дополнительные погрешности возникают в связи с тем, что при вычислении элементов теплового баланса применяются нелинейные операции и осреднение входных параметров с последующим вычислением потоков по средним значениям не всегда эквивалентно осреднению выходных параметров, рассчитанных по мгновенным значениям.

Если пределы изменений входных элементов не очень широки, то погрешности, связанные с нелинейностью, относительно малы и возможно применение любых методов осреднения и вычислений. Такие условия достаточно часто встречаются на практике, особенно

в аридной зоне, для которой типична ясная безоблачная погода при слабом ветре. Указанное можно иллюстрировать данными работы М. А. Каганова и М. Г. Санояна [9], из которой заимствован рис. 66 (исследование проводилось в Туркмении). Из корреляционного графика видно, что потоки, рассчитанные по мгновенным значениям входных элементов и по средним, практически совпадают в интервале осреднения от 1 часа до дня. Систематические отклонения, связанные с различием методов осреднения, не превышают,

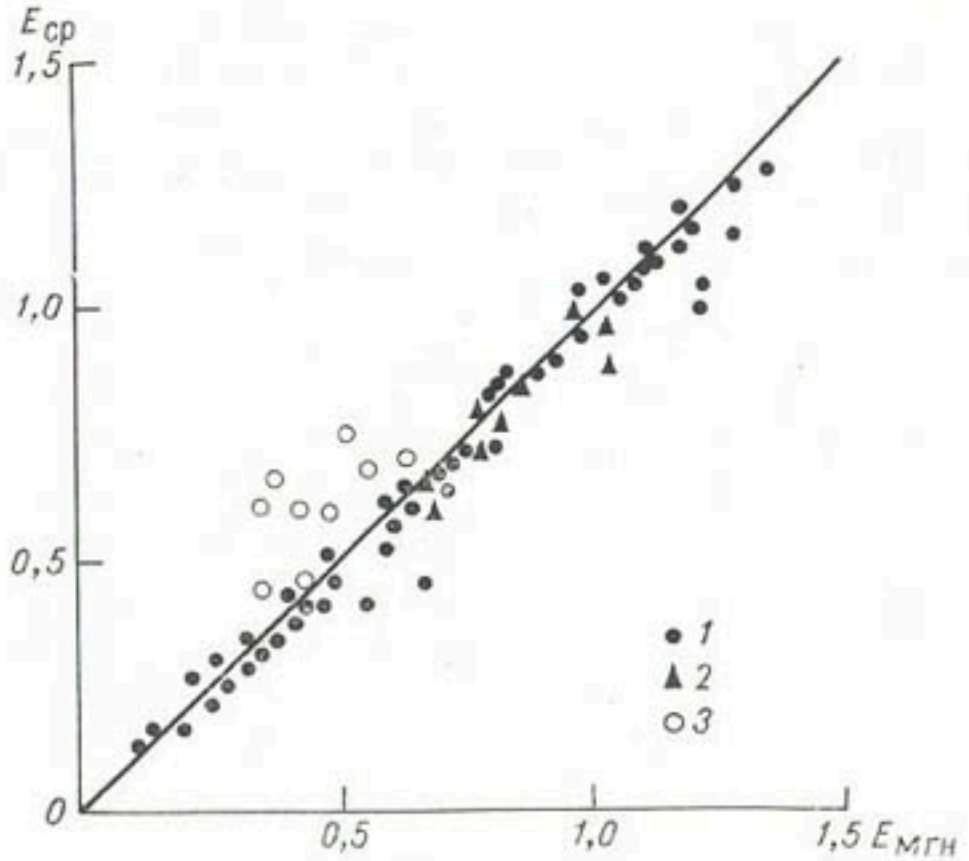


Рис. 66. Точность расчетной схемы метода теплового баланса при различных интервалах осреднения входных параметров.

$E_{ср}$ — суммарное испарение, рассчитанное по осредненным значениям входных параметров, $E_{мгн}$ — суммарное испарение, рассчитанное по мгновенным значениям входных параметров. Интервал осреднения входных параметров: *1* — один час, *2* — дневные часы суток, *3* — 24 часа.

как правило, 5—7%. При осреднении входных параметров за сутки систематические отклонения возрастают до 25—30%, что, конечно, недопустимо. Такое расхождение может быть связано с большими градиентами в ночное время, когда значения коэффициента обмена, а следовательно, и потоков малы.

Для краткосрочных наблюдений проблема репрезентативности еще не решена. Это связано, в частности, с тем, что только в самое последнее время появилась достаточно точная аппаратура, позволяющая получать исходные данные для подобного анализа. До сих пор балансовые методы применялись в основном для периодов порядка суток или более, для которых достаточна точность стандартной аппаратуры.

§ 3. Области применения различных методов определения влагообеспеченности

В зависимости от репрезентативности получаемых данных должен решаться и вопрос об области применения различных методов оценки влагообеспеченности (табл. 20).

По общим соображениям, неразрушающие биологические экспериментальные методы, не требующие отбора проб или повреждения растений, должны применяться в тех случаях, когда общее число исследуемых объектов невелико. Практически это бывает при выращивании растений в вегетационных сосудах или фитотронах. Помимо биологических методов, в таких условиях пригодны и вполне репрезентативны точечные измерения влажности почвы — в обоих случаях будет получена исчерпывающая и достаточно точная информация. Это относится как к измерениям динамики влаги, так и к определению испаряемости.

Биологические методы, для осуществления которых необходим отбор проб, целесообразно применять для вегетационных опытов в полевых условиях на небольших площадках или в культивационных сооружениях. Повторность отбора проб при этом и масса пробы могут быть минимальными, полученные же показатели достаточно надежно осреднены по площади, так как условия относительно однородны. Ограниченность объема зеленой массы и большие случайные отклонения единичного образца от среднего исключают возможность применения разрушающих методов для оценки влагообеспеченности отдельных растений в вегетационных сосудах или групп растений в фитотронах.

Помимо отмеченных методов, при работе в культивационных сооружениях и на малых площадках удобно применять и некоторые из методов оценки влагообеспеченности по интенсивности фотосинтеза и по влажности почвы (динамика роста растений и объема зеленой массы, различные электрические и радиоактивные почвенные влагомеры, измеряющие среднюю влажность почвенного монолита). Эти методы характеризуются более высокой репрезентативностью, так как позволяют получать осредненные показатели для значительного объема растительного покрова или поверхностного слоя почвы. Для рассматриваемого масштаба площадок в некоторых случаях при решении задач влагообеспеченности хорошие результаты дают почвенные испарители в режиме измерения влагозапасов или испаряемости.

Большинство биологических методов нецелесообразно применять в опытах на больших участках или в производственных условиях для оценок влагообеспеченности на полях. В таких вариантах отрицательными факторами являются необходимость ручных измерений или отбора проб, невозможность автоматизации и потребность в большом количестве образцов для обеспечения репрезентативности и точности. Что касается возможностей применения почвенных методов для сельскохозяйственных полей, то принци-

пиально может идти речь о создании автоматизированных информационных систем с датчиками влажности почвы. Однако и в этом случае необходима большая повторность измерений и сохраняется сложная обработка данных.

При определении испаряемости в опытах с вегетационными сосудами на небольших делянках и в культивационных сооружениях могут применяться энергетические показатели, но в этом случае основное внимание надо уделять точности измерений радиационного баланса, так как неоднородность подстилающей поверхности может иметь решающее значение.

Что касается репрезентативности рассмотренных групп методов во времени, то с этой точки зрения наилучшими характеристиками обладают методы, связанные с определением влажности почвы, при которых результаты измерений наименее подвержены воздействиям метеорологических параметров.

В случаях когда необходимо определять влагообеспеченность относительно больших участков, существенными преимуществами обладают метеорологические методы. Из биологических методов для этой цели могут применяться оценки интенсивности фотосинтеза по потоку углекислоты к деятельной поверхности, а также визуальные определения тургора по степени завядания листьев. Последний метод, хотя и подкупает простотой, но по существу позволяет только качественно оценивать состояние растительного покрова. При его использовании нет реальных возможностей определения дефицита влаги и норм полива, а успех его реализации полностью зависит от квалификации контролирующего персонала. Вследствие этого возможности применения оценки влагообеспеченности по завяданию весьма ограниченны, а сам метод вряд ли будет широко использоваться в условиях комплексной механизации сельского хозяйства.

Для метеорологических методов, так же как и для оценки интенсивности фотосинтеза по CO_2, характерной особенностью является значительная пространственная репрезентативность. Это обусловлено требованиями применения расчетных методов для однородных площадок и ограничением минимальных размеров участка. При использовании метеорологических методов необходимо определять коэффициент турбулентного обмена. Его можно получить при отсутствии пограничной адвекции, нарушающей стабильность сформированного приземного слоя воздуха.

Как уже указывалось выше, из условий трансформации на границе площадки можно определить минимальный размер участка порядка 300×300 м, что в общем соответствует размерам поливных полей.

Что касается репрезентативности во времени этих групп методов, то, как уже отмечалось, правомерность определения метеорологических параметров влагообеспеченности за короткие периоды времени в большинстве случаев сомнительна (по крайней мере в настоящее время). Поэтому достаточно точными и надежными

Таблица 20

Репрезентативность оценок влагообеспеченности

Показатель	Способ оценки влагообеспеченности	Показатель репрезентативности в пространстве	Изменчивость показателей во времени	Характеристика метода	Область применения методики
Физиологические параметры	По биологическим кривым	Отдельное растение или группа растений	Сезонный ход. Суточный ход	Лабораторный	Специальные исследования, вегетационные опыты
Весовое влагосодержание почвы. Объемное влагосодержание почвы	Расчет влагозапаса активного слоя при учете гидрологических коэффициентов почвы	Локальные измерения в месте установки датчика	Сезонный ход. Для слоя 0—30 см суточный ход	Лабораторный или полевой	Участки вегетационных опытов; культивационные сооружения; небольшие поля
Потенциал влаги в почве. Капиллярный потенциал	Сравнение измеренной величины с допустимым значением параметра	Локальные измерения в месте установки датчика	Сезонный ход. Для слоя 0—30 см суточный ход	Лабораторный или полевой	Специальные исследования. Вегетационные опыты. Культивационные сооружения
Элементы водного баланса	Биологические кривые или расчет влагозапаса	Однородное по характеристикам поле	Сезонный ход, суточный ход. Турбулентные пульсации	Полевой	Для полей размером 300×300 м и более в хозяйствах
Гидрометеорологические коэффициенты типа β	Непосредственно по допустимому значению	Однородное по характеристикам поле	Сезонный ход. Суточный ход. Турбулентные пульсации	Полевой	Для полей размером 300×300 м и более

будут суммы или средние значения параметров за день, за сутки или больший интервал. Такие данные достаточно репрезентативны, в особенности для аридной зоны, характеризующейся стабильностью погодных условий.

Большая репрезентативность во времени типична для относительных комплексных параметров, таких, как коэффициент влагообеспеченности β.

Метеорологические методы представляются также наиболее перспективными с точки зрения автоматизации измерений и стыковки с системами автоматизированного полива. Они позволят осуществлять полив по фактическим потребностям растений и оперативно рассчитывать не только сроки, но и нормы полива. Так как их использование требует значительного объема вычислений при обработке данных, целесообразно использовать аппаратуру совместно с вычислительной техникой.

В случае необходимости определения влагообеспеченности крупных районов наиболее подходящими представляются методы водного баланса и оценки по стандартным метеоданным, поскольку достаточно репрезентативные данные по осадкам и стоку можно получить в основном для больших областей. С другой стороны, материалы сети метеостанций, репрезентативные для больших районов, в целом не могут отражать микроклиматические особенности полей или участков. В случае применения подобных методов для отдельных полей в пределах хозяйства их точность, как правило, невелика, требуется большая предварительная работа по определению поправочных коэффициентов для учета микроклиматических особенностей и различий в характере подстилающей поверхности.

В заключение приведем табл. 20, где собраны основные характеристики различных методов оценки влагообеспеченности.

Глава V

АВТОМАТИЗАЦИЯ ИЗМЕРЕНИЙ И ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ ПРИ ОЦЕНКАХ ВЛАГООБЕСПЕЧЕННОСТИ РАСТЕНИЙ И СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ПОЛЕЙ

§ 1. Структурные схемы систем сбора информации

Перспективы автоматизации измерений и обработки информации мы будем рассматривать здесь в зависимости от конкретных задач, выявляя в первую очередь возможности автоматизации перечисленных выше методов.

Большинство биологических методов имеет ограниченные возможности, так как предусматривает по самой идее активное участие оператора в осуществлении измерений. Применительно к этим методам может идти речь только об автоматической регистрации результатов измерений с последующей обработкой данных средствами современной вычислительной техники. Это же относится и к некоторым наиболее сложным методам определения характеристик почвенной влаги. Большинство же почвенных и балансовых методов открывает широкие возможности автоматизации измерения.

В зависимости от репрезентативности того или иного метода и поставленной цели при автоматизации измерений необходимо решить сложный комплекс проблем телеизмерений и централизованного сбора информации с частичной или полной автоматической обработкой данных. Подобные измерительные комплексы уже в настоящее время могут использоваться в установках для осуществления автоматизированных научных исследований, программа работы которых может задаваться жестко или автоматически корректироваться в зависимости от хода эксперимента. Необходимость в такого рода аппаратуре остро ощущается в специальных установках для биологических экспериментов типа фитотронов или светоустановок для выращивания растений в частично контролируемых условиях. В сельскохозяйственном производстве имеется насущная потребность в автоматических комплексах оценки влагообеспеченности для сооружений защищенного грунта. Эта задача стоит особенно остро вследствие быстрого развития данной отрасли сельского хозяйства.

Оценки влагообеспеченности могут быть реализованы при измерении различных комбинаций параметров почвы или приземного воздуха. Для этого, как правило, необходима комплексная информация при синхронной записи значительного количества измеряемых величин и автоматизации обработки исходного материала [23]. Такая обработка может производиться на специализированных вычислителях типа описанных выше для реализации метода теплового баланса и корреляционного метода, а также на универсальных вычислителях. Естественно, что к аппаратуре для хозяйственных систем или для научных исследований предъявляются различные требования.

Развитие комплексной аппаратуры идет в двух основных направлениях: первое — создание систем с обработкой информации непосредственно на поле с помощью специализированных вычислительных устройств; второе — разработка измерительных комплексов с промежуточной регистрацией данных в форме, удобной для обработки на универсальных вычислительных машинах (ВМ). Программа работы специализированных ВМ существенно ограничена, поэтому они не могут вести обработку данных в полном объеме. Это приводит к частичной потере информации. Использование промежуточной регистрации данных позволяет отказаться от вычислений в реальном масштабе времени, что иногда бывает желательно, и использовать максимальное количество информации, представляемое датчиками. При этом в процессе обработки на вычислительной машине программы могут корректироваться в зависимости от результатов расчета и анализа материалов.

Типичные задачи, которые могут быть решены автоматизированными измерительными комплексами, будут рассмотрены ниже.

В любом случае первичная обработка информации предусматривает преобразование ее в электрический сигнал с учетом необходимых функциональных зависимостей; это обычно осуществляется чувствительными элементами и измерительными блоками датчиков. Иногда после первичного преобразования сигнал усиливается и трансформируется в форму, удобную для передачи и обработки. Далее, после передачи производятся вычислительные операции с аналоговым сигналом или преобразование аналог-код для вычисления на ЭВМ. При любом типе обработки одна из необходимых операций — интегрирование или суммирование, так как вычисляются осредненные показатели за срок не менее 1 часа.

В автоматизированной аппаратуре используются системы параллельной или последовательной обработки информации. Каждая из них обладает своими достоинствами и недостатками. Некоторые из этих особенностей (повышение погрешности при последовательных измерениях в турбулентной атмосфере) упомянуты выше, другие связаны с применением относительно сложных элементов схем или с усложнением схемы комплекса

в целом за счет применения параллельных каналов обработки в соответствующих системах.

На рис. 67 приведены блок-схемы систем с последовательной и параллельной обработкой для случая применения специализиро-

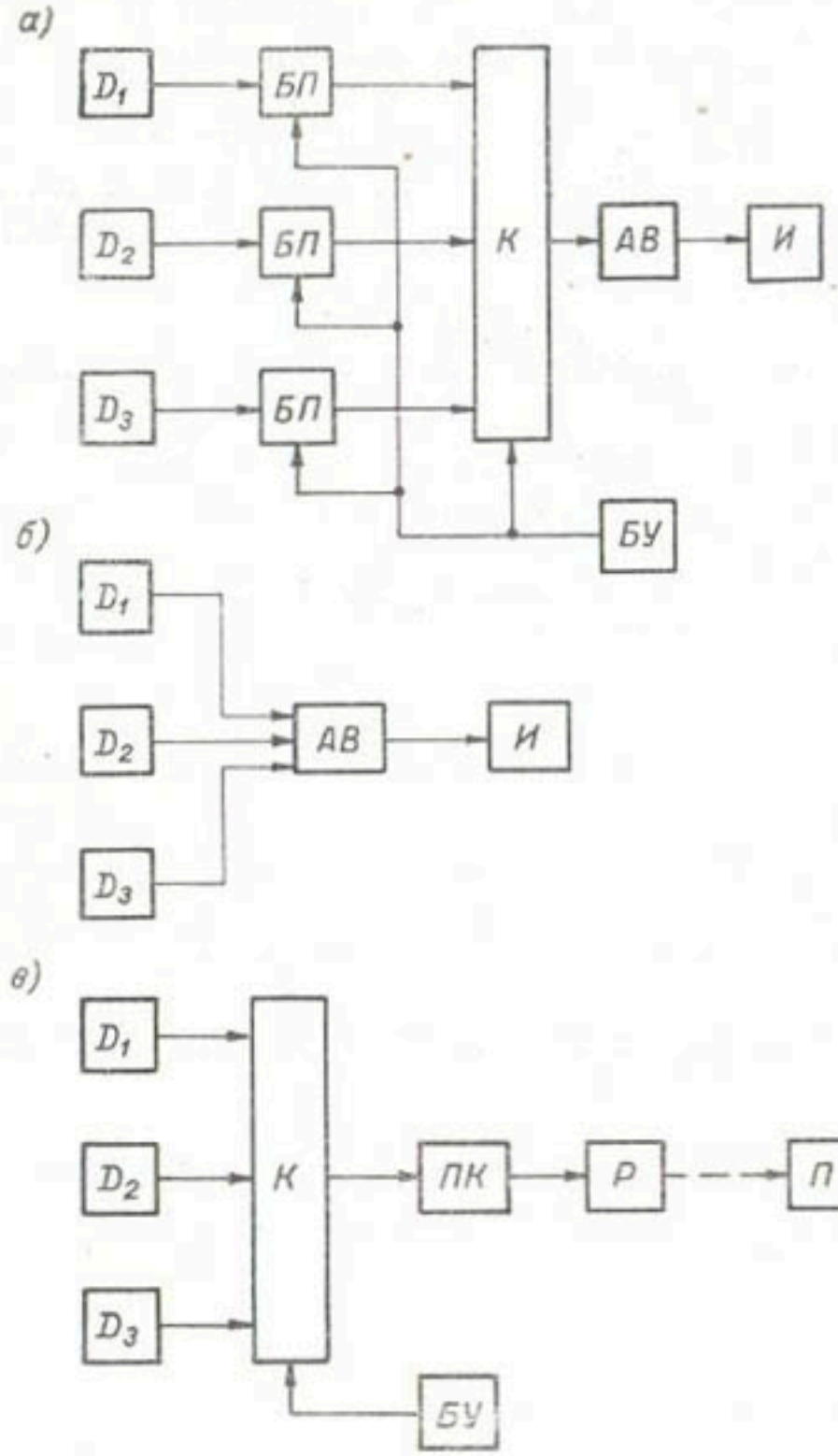


Рис. 67. Блок-схемы систем обработки информации.

а — системз с последовательной обработкой, *б* — система с параллельной обработкой, *в* — система с промежуточной регистрацией. $Д_1$, $Д_2$, $Д_3$ — датчики, *К* — коммутатор, *БУ* — блок управления, *АВ* — аналоговый вычислитель, *БП* — блок памяти, *И* — индикатор, *ПК* — преобразователь, *Р* — регистратор, *П* — преобразователь аналог-код, *ЭВМ* — универсальный цифровой вычислитель.

ванных аналоговых вычислителей и промежуточной регистрации данных на вспомогательный носитель.

Система с последовательной обработкой (рис. 67 *а*) аналогична рассмотренному выше теплобалансографу Ю. Л. Розенштока, а система с параллельной обработкой информации на

аналоговом вычислителе (рис. 67 *б*) легла в основу схемы установки «Поток». Оба эти примера достаточно типичны. Система с последовательной обработкой и преобразованием аналог-код (рис. 67 *в*) применена в телеизмерительном комплексе Агрофизического института. В последнем случае регистрация может осуществляться на центральном пункте сбора информации, имеющем сетевое электропитание, а не в поле, где необходимо батарейное или аккумуляторное питание установок.

В двух первых вариантах схем обработка производится в реальном масштабе времени. Третий вариант позволяет отойти от реального масштаба и вести обработку на рабочих скоростях современных вычислительных машин с соответствующей концентрацией информации во времени. В случаях когда нет необходимости в получении оперативной информации в пределах суток, система ускоренной обработки на ЭВМ может оказаться предпочтительной, так как она дает возможность более полно использовать полученные данные. Шаг квантования во времени задается коммутатором и должен выбираться с учетом конкретных задач измерения.

При использовании информационных систем для централизованного сбора информации и управления поливами непосредственно в сельскохозяйственных производственных предприятиях целесообразна другая структура системы. Поскольку наиболее сложным и дорогим элементом информационной системы для оценки влагообеспеченности является вычислительное устройство, целесообразно использовать одно такое устройство (специализированное аналоговое или универсальное цифровое) для группы датчиков, охватывающих все участки, на которых должно производиться измерение.

Блок-схема подобной информационной системы приведена на рис. 68. Группа датчиков (в примерной схеме по три элемента в группе) имеет свой коммутатор и блок управления, включаемый по вызову центрального пункта (через блок вызова *БВ*). Эти элементы обеспечивают поочередный опрос и подключение датчиков к линии, причем при работе коммутатора одной группы все остальные блокированы. Блок управления через коммутатор центрального пункта сбора информации подключает к вычислительному устройству поочередно все группы датчиков и обеспечивает выдачу от *БВ* сигнала вызова группы. Возможна кодовая система вызова группы или разделение сигнала по частоте — обычные методы, применяемые в телеуправлении.

В зависимости от типа датчика и структуры системы передача может быть реализована по проводной линии связи или по радиоканалу, причем каждая группа при необходимости может быть дополнена усилителем или преобразователем, а также буферным регистратором.

В некоторых случаях для изменения временного масштаба при обработке информации может использоваться память ЭВМ.

Подобный комплекс централизованного сбора и обработки информации способен работать с большим количеством групп датчиков, направляющих информацию в центральный пункт по вызову. Этот комплекс должен быть одним из элементов системы управления поливом. Вычислительная техника в данном случае,

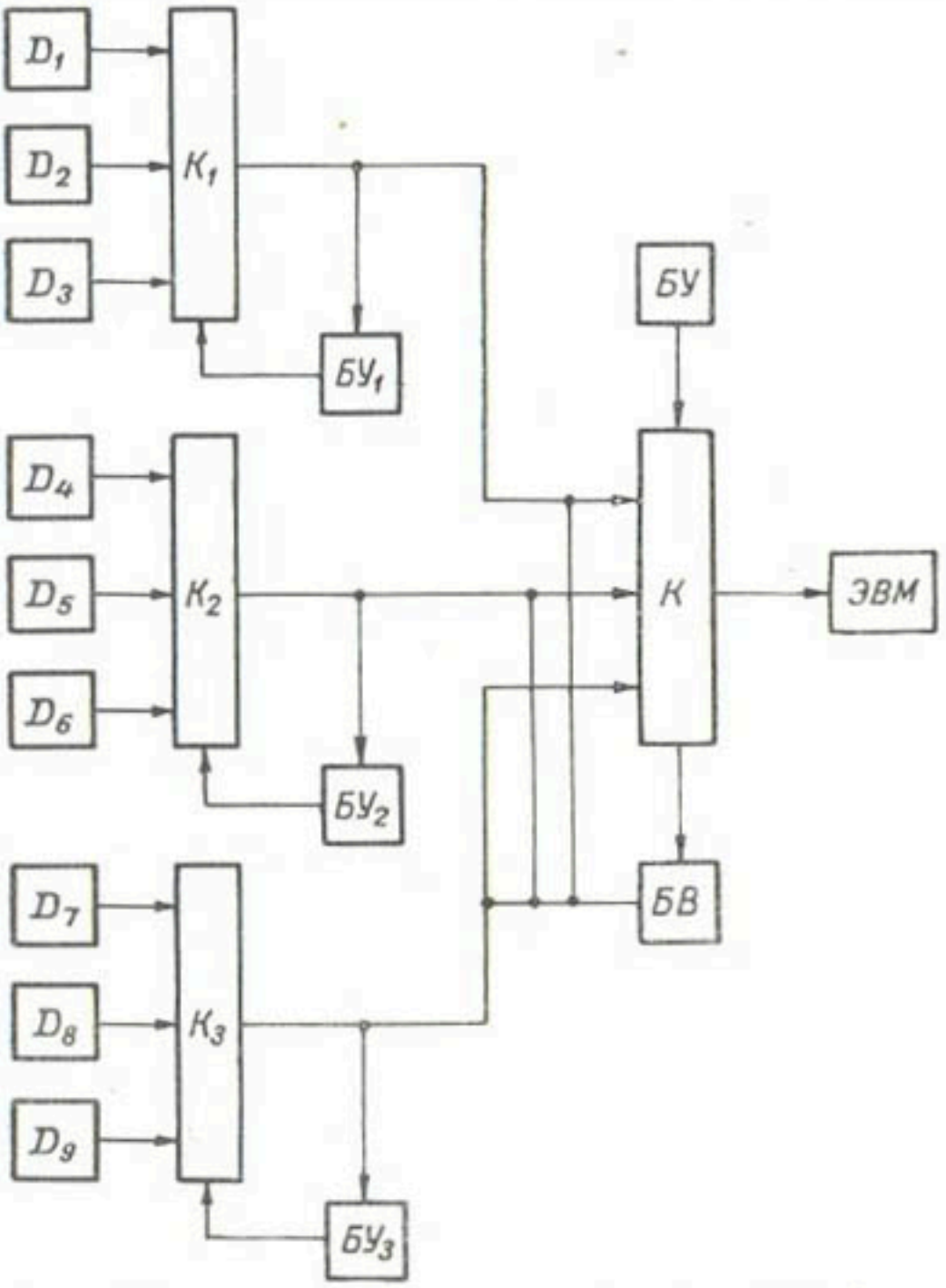


Рис. 68. Блок-схема системы централизованного сбора информации.

$Д_1$—$Д_9$ — датчики, $К_1$—$К_3$ — групповые коммутаторы; $БУ_1$—$БУ_3$ — групповые блоки управления опросом датчиков, $БВ$ — блок вызова группы, $К$ — коммутатор центрального пункта, $БУ$ — блок управления центрального пункта, $ЭВМ$ — цифровой вычислитель со встроенным преобразователем.

помимо обработки информации, решает большой круг задач мелиорации и распределения воды. В зависимости от степени автоматизации рабочих органов сигналы с выхода вычислительного устройства могут использоваться для ручного или автоматического управления элементами системы полива.

В последние годы много внимания уделяется проблеме автоматизации полива. При успешном развитии автоматизации рас-

пределительных систем для воды до последнего времени остается открытым вопрос об обоснованных критериях полива и автоматизации подачи воды на поля в соответствии с фактическими потребностями растений.

Как отмечалось выше, ряд методов, пригодных для оценки влагообеспеченности в полевых условиях, допускает возможность стыковки датчиков с комплексами централизованного сбора информации. В настоящее время в автоматизированных системах полива применяются в основном оценки влагообеспеченности сельскохозяйственных полей по почвенным показателям. При этом основная сложность применения указанных методов — недостаточная репрезентативность и необходимость значительной повторности измерений. Подобные задачи могут быть относительно просто решены при использовании систем централизованного сбора и обработки информации.

Альтернативным представляется вариант применения агрометеорологических методов, которые обеспечивают получение необходимой информации при установке на поле малого количества датчиков. В этом случае непосредственно на участке, размер которого выбирается с учетом удобства подачи воды и требований применяемого метода измерений, устанавливается необходимый комплект датчиков (например, комплект датчиков теплового баланса). На центральном пункте осуществляется обработка и накопление информации, по которой рассчитываются сроки и нормы полива, по выбранным критериям, а также уточняется план распределения воды в пределах хозяйства в целом. При такой структуре автоматизированной системы и обработке данных на универсальном вычислительном устройстве в качестве критериев полива могут использоваться биологические кривые испарения, устойчивые функциональные или корреляционные зависимости между агрометеорологическими параметрами и влажностью почвы (биологическими показателями), а также комплексные параметры типа коэффициента влагообеспеченности.

Недостаток фактического материала не позволяет сформулировать требования к подобной системе с точки зрения обоснованного подбора критериев влагообеспеченности. В настоящее время особо актуален вопрос о проведении комплексных исследований в этом направлении. Для этого случая не всегда целесообразно применять универсальную вычислительную технику при обработке данных в реальном масштабе времени непосредственно в полевых условиях. Работы такого рода должны проводиться в различных агроклиматических зонах и для большого ассортимента различных сельскохозяйственных культур. Достаточно надежные и обоснованные критерии могут быть получены в результате многолетних наблюдений на одной площадке и по однородной программе. Затем применимость выбранного критерия проверяется в массовом эксперименте в пределах зоны.

При организации подобных работ возможен выбор одного из двух путей обработки данных, связанных с концентрацией информации. В удаленных районах, где могут возникать трудности с обеспечением электропитания сложной аппаратуры, целесообразно применять установки с автономным питанием. Эти установки должны осуществлять измерение и вычисление необходимых агрометеорологических параметров и комплексных показателей влагообеспеченности поля. В такой аппаратуре удобны аналоговые специализированные вычислительные устройства более простые и экономичные, чем устройства дискретного счета с необходимыми функциональными характеристиками. Некоторые из специализированных установок рассмотрены ранее. Необходимым элементом измерительного комплекса такого рода является интегратор, существенно упрощающий обработку материалов и позволяющий определять суммы или средние значения параметра за длительные периоды времени (до 10 суток). При невозможности автоматической регистрации в аппаратуре такого рода предусматривается визуальный отсчет и ручная запись данных интегратора через заданные промежутки времени (от 1—2 часов и более).

Другой путь концентрации данных — преобразование и регистрация информации в форме, пригодной для обработки с применением универсальной вычислительной техники. Обработка в этом случае может осуществляться после завершения наблюдений. Один из возможных вариантов реализации этого пути предусматривает промежуточное преобразование и запись сигналов на магнитную ленту в аналоговой форме с последующим преобразованием в код на центральном пункте обработки. Для регистрации информации и ввода в вычислительные устройства целесообразно применять различные перфораторы, но это, как правило, связано с необходимостью питания установки от сети переменного тока. Использование этого варианта записи возможно в сочетании с дистанционными датчиками или телеизмерительными системами, обеспечивающими передачу информации в центральный пункт.

§ 2. Элементы информационных систем

В зависимости от метода, выбранного для оценки влагообеспеченности, системы централизованного сбора и обработки данных выполняют различные функции. Помимо селекции группы датчиков, такие системы должны осуществлять осреднение данных во времени или в пространстве, определение гидрометеорологических или биологических показателей влагообеспеченности, прогноз полива, а также расчет норм полива для каждого поля с учетом поддержания оптимальных условий развития растительного покрова для данной культуры и фазы развития.

В случае применения универсальной вычислительной техники для управления поливом в сельскохозяйственном предприятии эти данные могут быть использованы для расчета прогнозов (график работ по поливу, план оптимального распределения влаги и т. п.). Выработанные подобным комплексом рекомендации или сигналы полива репрезентативны во времени в пределах 2—3 дней и могут применяться как при ручном управлении поливом, так и в автоматизированных системах.

Программы обработки данных на ЭВМ для научных исследований, помимо указанных операций, должны включать элементы структурного и корреляционного анализа. Программы могут меняться в зависимости от конкретных задач исследования и охватывать различные группы агрометеорологических, гидрологических и физиологических параметров.

Телеизмерительные системы и комплексы централизованного сбора информации содержат ряд общих узлов и могут комплектоваться из стандартизированных элементов. К числу таких блоков относятся коммутаторы, элементы логических и пересчетных схем, накопители информации, анализаторы знака измеряемых параметров, блоки преобразования аналог-код и т. п.

К настоящему времени разработано большое количество вариантов различных телеизмерительных систем, приспособленных для решения конкретных задач (например, [7, 10, 11, 12, 22]). Каждая из таких систем по своим характеристикам не всегда удовлетворяет требованиям смежных областей науки и техники к телеизмерительной аппаратуре. Поэтому, комплектуя телеизмерительные системы, часто приходится разрабатывать отдельные элементы или блоки. Для синтеза систем сбора информации удобны элементы телеизмерительной системы Агрофизического института (ТИС-АФИ), разработанной специально для автоматизации агрофизических исследований и по своим характеристикам (форма сигнала, входное сопротивление, система выдачи данных и т. п.) приспособленной для получения информации о параметрах почвы и приземного слоя воздуха и передачи этих данных для обработки на ЭВМ.

Уже отмечалось, что при проведении измерений в приземном слое атмосферы, за исключением редких случаев использования информации для получения структурных характеристик метеопараметров, нет необходимости в большой частоте опроса. Обычно осреднение входных параметров производится в пределах интервалов 20—30 мин., причем для обеспечения репрезентативности измерений достаточно иметь 10—15 отсчетов в пределах этого интервала времени. Благодаря этому в агрофизических и агрометеорологических исследованиях и измерениях возможно применение многоканальной телеизмерительной аппаратуры с временным разделением измерительных каналов. По такой системе работает и телеизмерительная станция Агрофизического института, разработанная под руководством А. Л. Зусеса [7].

В качестве датчиков станции используются полупроводниковые терморезисторные термометры и генераторные датчики типа рассмотренных ранее измерителей тепловых потоков. Входные сигналы датчиков представляют собой медленно меняющиеся постоянные напряжения. Выходные сопротивления измерительных блоков лежат в пределах 0,3—3,0 Ком.

Телеизмерительная система АФИ может работать на проводную линию связи и на радиоканал. В первом случае из рассмот-

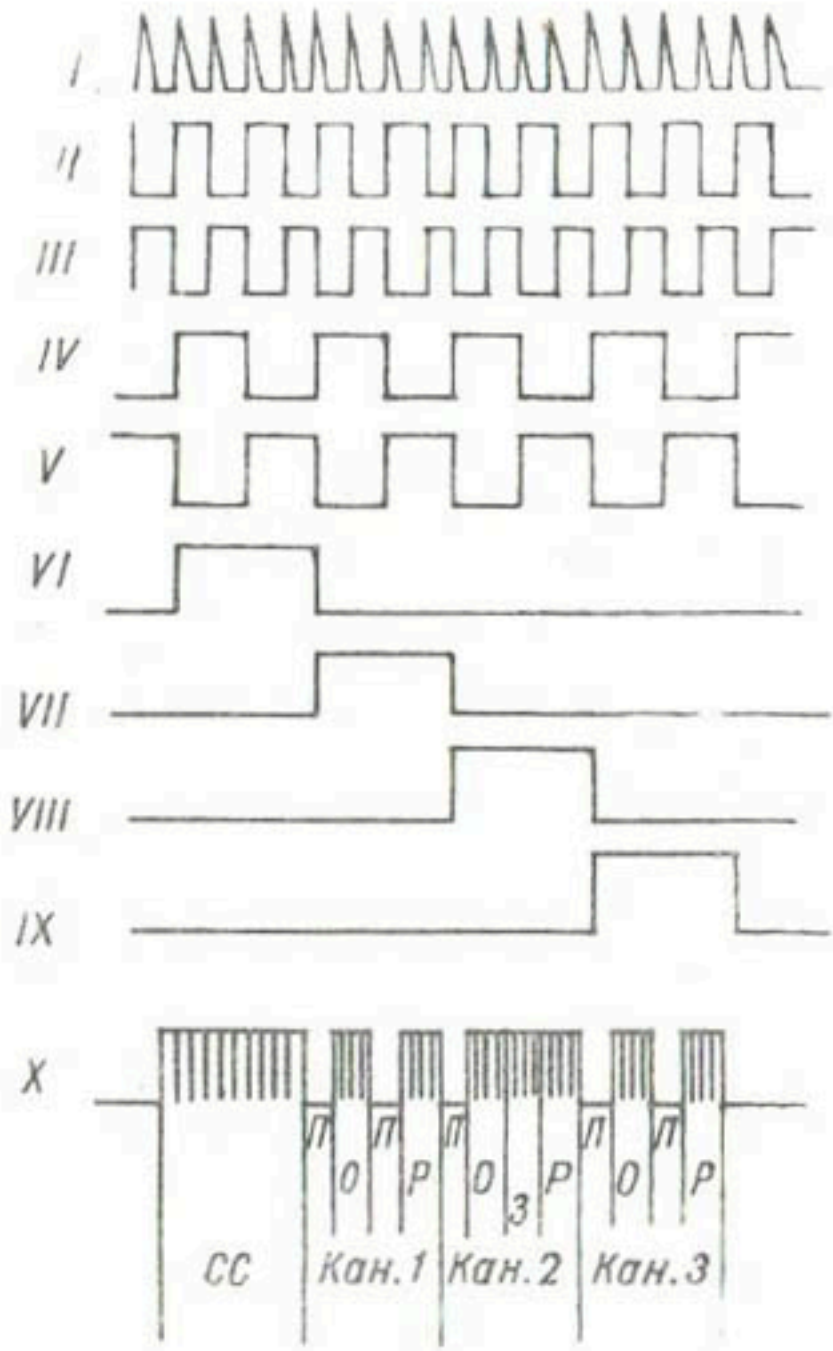


Рис. 69. Временная диаграмма передающей части телеметрической системы.

СС — сигнал синхронизации. *П* — пауза. *О* — опорный сигнал. *Р* — рабочий сигнал. *З* — сигнал знака.

ренной далее блок-схемы исключается тракт импульсной модуляции несущей радиочастоты.

Применение временного разделения каналов обеспечивает снижение уровня помех по сравнению с системами параллельной передачи; кроме того уменьшение помех связано с использованием промежуточного преобразования аналог-частота и с ограничением рабочей полосы частот в передаваемом сигнале.

Фактически в телеизмерительном комплексе Агрофизического института применена комбинированная система, в которой сигналы передаются с временным разделением, причем для выде-

ления рабочих и вспомогательных каналов использовано частотное разделение сигналов. Временная диаграмма сигнала для измерительного канала приведена на рис. 69, блок-схема передающего устройства — на рис. 70.

Первый такт цикла опроса — пауза — используется для разделения каналов в дешифраторе приемного устройства. Второй такт — передача опорного сигнала, соответствующего нулевому уровню измеряемого параметра. В этом такте на входе основного преобразователя аналог-частота сигнал отсутствует и в тракт выдается напряжение номинальной поднесущей частоты. Исполь-

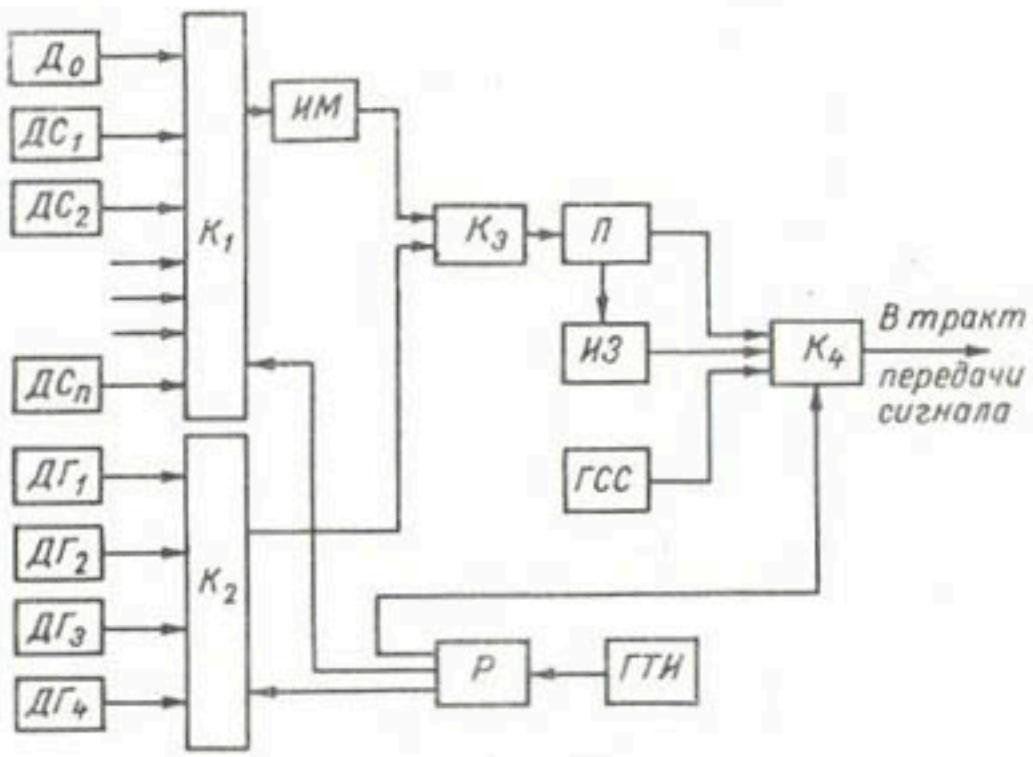


Рис. 70. Блок-схема передатчика телеметрической системы.

$Д_0$ — датчик опорного сигнала, $ДС_1$—$ДС_n$ — датчики сопротивления, $ДГ_1$—$ДГ_4$ — генераторные датчики, $К_1$—$К_4$ — коммутаторы, *ИМ* — измерительный мост, *П* — преобразователь ток-частота, *ИЗ* — индикатор знака, *ГСС* — генератор сигнала синхронизации, *Р* — распределитель, *ГТИ* — генератор тактовых импульсов.

зование опорного сигнала в дешифраторе позволяет компенсировать медленный дрейф характеристик и случайные погрешности преобразования, возникающие из-за нестабильности элементов передающего блока.

Третий такт — передача сигнала знака параметра. Частота сигнала знака выбрана на порядок ниже поднесущей, благодаря чему облегчается селекция сигнала знака. Четвертый такт — передача рабочего сигнала от датчика. Девиация частоты по отношению к опорному сигналу пропорциональна измеряемому значению параметра.

Приведена блок-схема станции в восьмиканальном варианте. Для группы датчиков сопротивления *ДС* один измерительный блок используется для нескольких чувствительных элементов.

В другой группе каждый из чувствительных элементов снабжен отдельным измерительным блоком *ДГ*.

Коммутатор станции условно разделен на четыре блока, выполняющих различные функции в общем цикле работы. Практически эти элементы могут быть объединены в один общий блок коммутации. Коммутатор K_1 обеспечивает подключение серии чувствительных элементов к общему измерителю. Аналогичный коммутатор K_2 подключает генераторные датчики или измерительные блоки отдельных приборов. Третий коммутатор K_3 переключает группы датчиков на входе модулятора преобразователя. Функциональный коммутатор K_4 необходим для управления работой передающего блока. Он обеспечивает нормальное чередование сигналов в цикле опроса одного канала измерений, а в соответствующем канале подает на выходное устройство сигнал синхронизации. Для этого используется датчик сигнала синхронизации *ДС*, подключаемый в начале опроса серии датчиков и обеспечивающий синхронизацию работы передатчика и приемника и предупреждение сбоев в последовательности опроса каналов.

Генератор тактовых импульсов *ГТИ* задает время такта в цикле опроса и управляет работой коммутаторов через распределитель *Р*.

Коммутаторы поочередно подключают постоянные напряжения с выходов датчиков на вход транзисторного балансного модулятора. Амплитудно модулированный сигнал затем усиливается и используется для управления преобразователем и индикатором знака. Частота модуляции выбрана равной половине частоты синхросигнала. Для деления частоты и формирования управляющего напряжения модулятора применен формирователь, который обеспечивает снижение порогового уровня сигнала и уровня помех при эффективном управлении модулятором.

В качестве преобразователя аналог-частота в телеизмерительной системе Агрофизического института использован *LC*-генератор с управляемой индуктивностью, изменение которой пропорционально значению напряжения на входе преобразователя [1].

В индикаторе знака основным элементом служит логическая схема, на выходе которой сигнал появляется только в случае совпадения фаз напряжений от формирователя и от модулятора. Сдвиг фаз в модуляторе обусловлен знаком постоянного напряжения на его входе. Сигнал знака, подаваемый в тракт передачи, имеет частоту, равную управляющей частоте модулятора, и выдается в случае отрицательной полярности входного напряжения. Отсутствие сигнала знака в цикле опроса данного канала свидетельствует о положительном значении измеряемого параметра.

Коммутатор является одним из наиболее существенных узлов телеизмерительных комплексов (см. рис. 67, 68). Рассмотрим более подробно 16-канальный коммутатор [2] телеизмерительной системы АФИ (рис. 71), поскольку аналогичные блоки могут

найти применение не только в таких системах, но и в большинстве комплексов централизованного сбора информации. Для коммутаторов общего применения нет необходимости в усложнении схемы, связанном с циклом опроса канала измерений (в телеизмерительной системе АФИ программа опроса канала значительно усложнена).

Распределитель коммутатора собран на статических триггерах. Управляющий сигнал подается от генератора тактовых импульсов. В само́м коммутаторе используются статические ключевые схемы в сочетании с диодными матрицами совпадений.

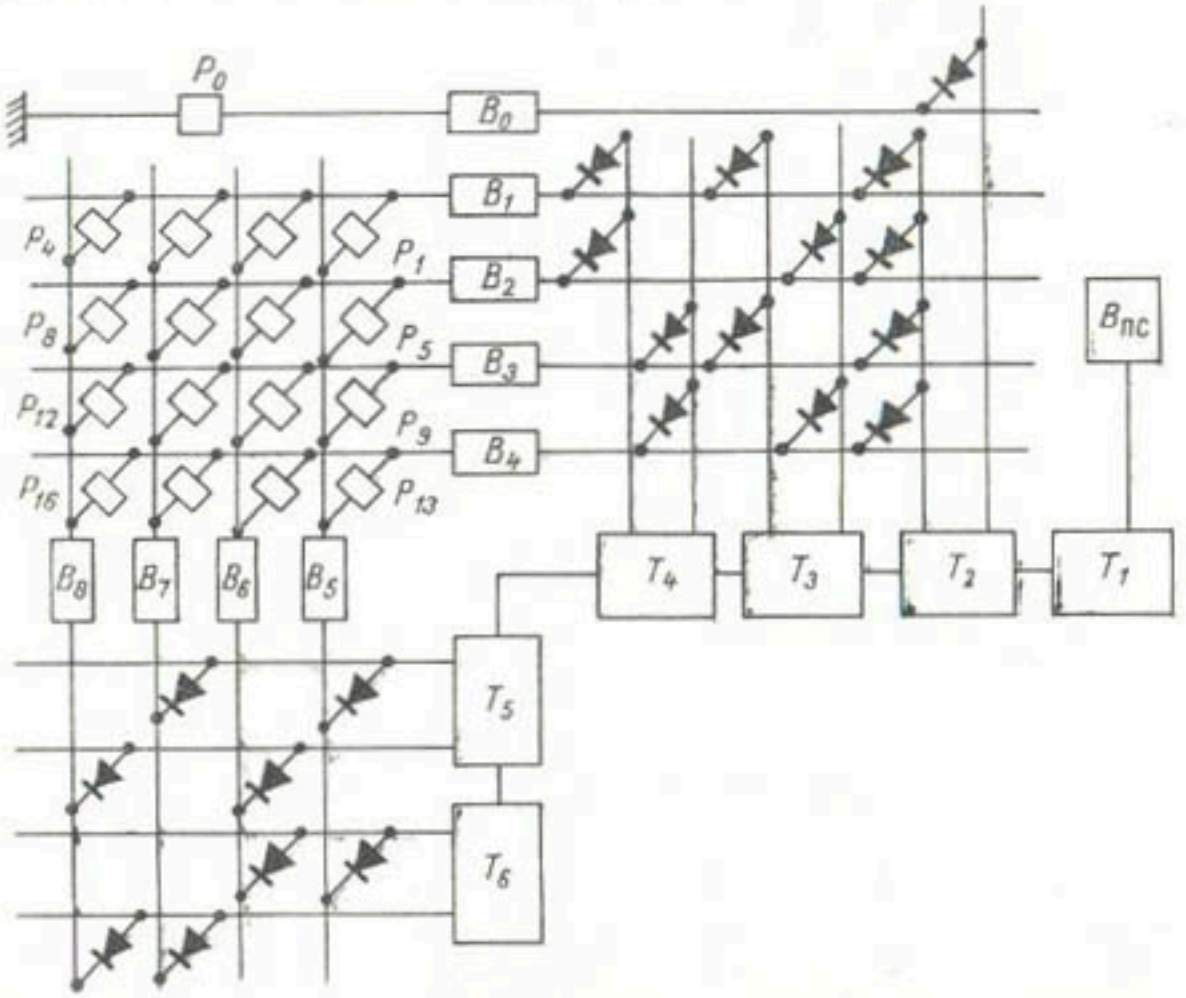


Рис. 71. Схема коммутирующего блока телеметрической системы.

Выходные элементы коммутатора — магнитоуправляемые контакты, обмотки которых включены в двухкоординатную матрицу, а сами контактные группы используются для коммутации соответствующих узлов телеизмерительной системы.

Двухкоординатная матрица включает коммутаторы K_1 и K_2. Группа вентилей $B_5 — B_8$ выполняет функции коммутатора K_3. Группа вентилей на триггерах T_1 и T_2 вместе с вентилем канала синхронизации P_1 образуют коммутатор K_4, обеспечивающий манипуляцию пауза — сигнал, опорный сигнал — рабочий сигнал, а также передачу сигнала знака в тех случаях, когда это необходимо. Примененная система коммутации исключает одновременную передачу более чем одного из четырех сигналов (знак опорный, рабочий, синхронизации) и работу более чем одного датчика в схеме преобразования аналог-частота.

При применении коммутаторов такого типа в системах регистрации информации по вызову с диспетчерского пункта необходимо дополнение схемы блокирующим реле, исключающим передачу до момента вызова.

Двухкоординатная матрица запитывается от двух диодных матриц совпадения. В любом сочетании положений триггеров $T_3 — T_4$ или $T_5 — T_6$ необходимое сочетание напряжений подается только на одну горизонтальную и одну вертикальную шину. Соответственно только через одну из обмоток магнитоуправляемых контактов протекает ток.

Работа приемной части телеметрической станции АФИ может быть иллюстрирована временной диаграммой, показанной на рис. 72.

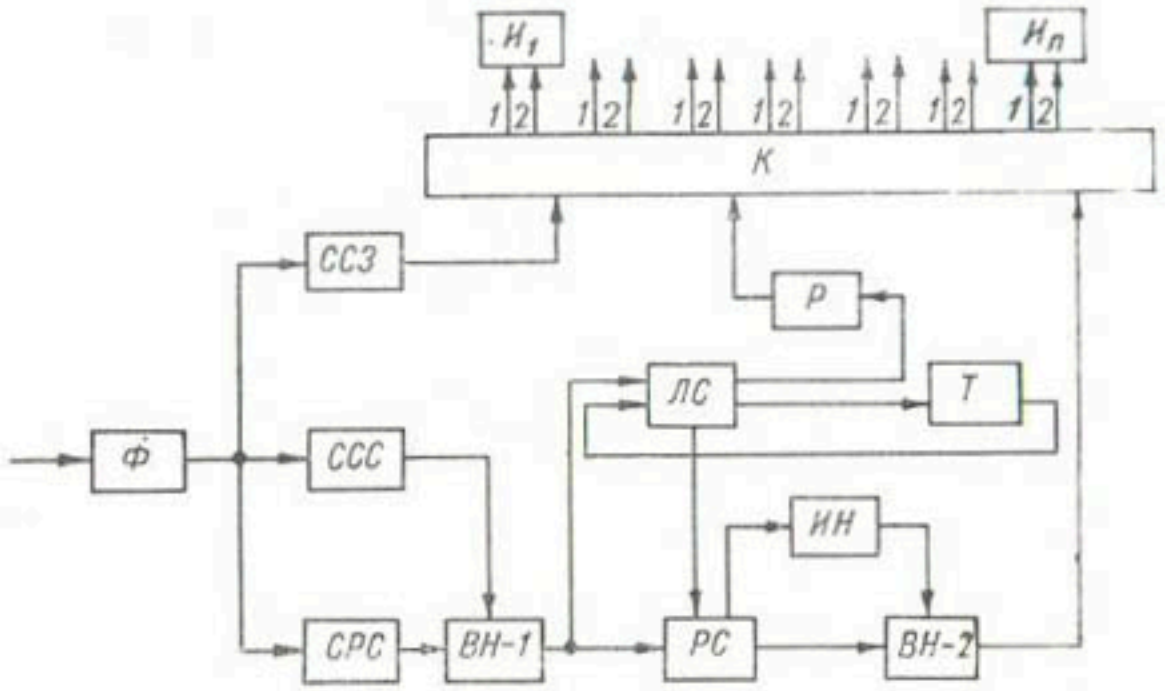


Рис. 72. Блок-схема приемной части телеметрической системы.

Ф — формирователь, *ССЗ* — селектор сигнала знака, *ССС* — селектор сигнала синхронизации, *СРС* — селектор рабочего сигнала (частотный фильтр), *ВН-1* — главный вентиль рабочего канала, *ЛС* — логическая схема, *Т* — таймер, *РС* — реверсивный счетчик, *ИН* — индикатор нуля, ВН-2 — выходной вентиль дешифратора, *Р* — распределитель, *К* — коммутатор, $И_1$—$И_п$ — выходные индикаторы, *1* — сигнал знака, *2* — сигнал величины параметра.

Приемник телеизмерительной системы АФИ (блок-схема на рис. 73) содержит следующие основные блоки.

1. Блок входного преобразователя. Помимо обычных входных каскадов приемника, этот блок содержит функциональные элементы, обеспечивающие формирование напряжения сигнала на входе и преобразование его в форму прямоугольных импульсов, необходимую для дальнейшей обработки сигнала. В этом блоке сохраняется неизменной частота входного напряжения.

2. Система синхронизации. Этот блок состоит из нескольких параллельных каналов селекции сигнала синхронизации. При использовании нескольких групп датчиков каждой группе присваивается свой сигнал синхронизации, а блок синхронизации приемника обеспечивает подключение группы выходных индикаторов,

соответствующих опрашиваемым датчикам. В каждом канале селекции синхросигнала осуществляется дополнительное формирование импульса за счет деления частоты сигнала с помощью триггера. Далее, с помощью усилителя с двойным Т-образным мостом подавляются сигналы любой частоты, кроме частоты синхронизации, которая подается на управляющий элемент и запускает цикл дешифровки рабочего сигнала.

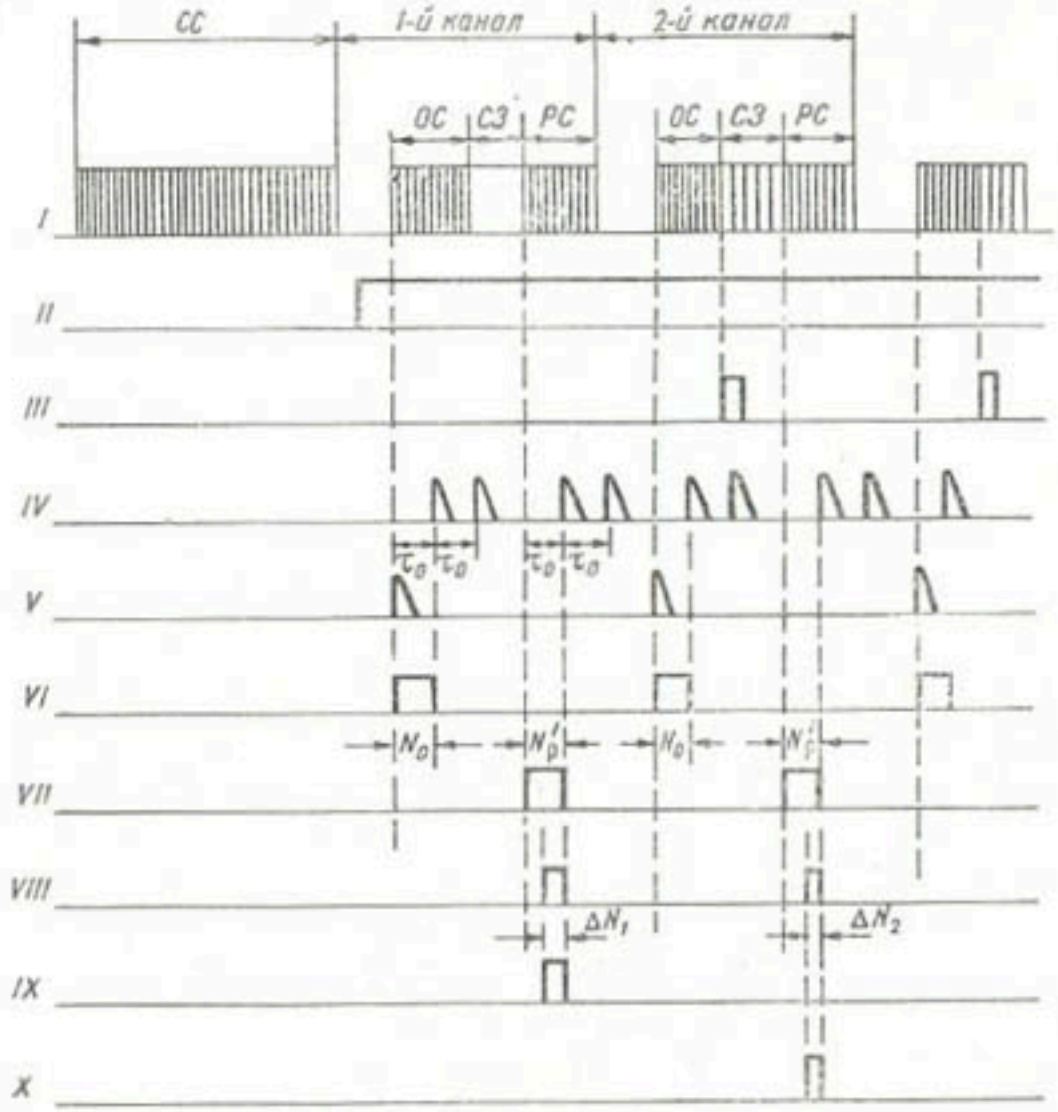


Рис. 73. Временная диаграмма приемной части телеметрической системы.

I — сигнал на входе приемника, *II* — вход управления вентиля *ВН-1*, *III* — выход селектора сигнала знака, *IV* — выход таймера, *V* — вход распределителя; *VI* — первый вход реверсивного счетчика, *VII* — второй вход реверсивного счетчика, *VIII* — выход реверсивного счетчика, *IX* — выходной индикатор 1-го канала измерений, *X* — выходной индикатор 2-го канала измерений. *СС* — сигнал синхронизации, *СЗ* — сигнал знака, *ОС* — опорный сигнал, *РС* — рабочий сигнал.

При появлении сигнала на выходе системы синхронизации запускается ждущий мультивибратор. Задний фронт импульса мультивибратора открывает вентили в тракте рабочего сигнала и подготавливает схему к приему информации по рабочему каналу. Длительность импульса мультивибратора выбрана такой, что открывание вентиля происходит перед началом сигнала опорной частоты.

3. Система селекции сигнала знака. Этот блок по структуре аналогичен селектору сигнала синхронизации. Разделение этих

сигналов осуществляется по частоте и реализуется за счет соответствующей настройки двойных Т-образных мостов. Триггер на выходе селектора знака коммутирует вентили выходных счетчиков и обеспечивает раздельную регистрацию рабочего сигнала разных знаков. В случае применения выходного реверсивного счетчика этот же триггер коммутирует его входы.

4. Управляющая логическая схема. Этот блок содержит систему вентилей, установленных во входном тракте дешифратора и в управляющей и выходной цепях таймера. В процессе работы приемника логическая схема осуществляет коммутацию опорного и рабочего сигналов на входе дешифратора, а также управляет работой таймера, обеспечивающего выдержку времени в пределах каждого из рабочих тактов цикла опроса одного канала измерений. После завершения цикла опроса данного канала сигнал с коммутатора возвращает логическую схему в начальное положение. Запуск системы осуществляется первым импульсом из пакета опорного сигнала. После завершения опроса данной группы датчиков с коммутатора подается сигнал запрета, перекрывающий основной канал передачи рабочего сигнала. Вентиль запрета открывается только после прихода импульса с выхода соответствующей схемы селектора синхронизации, разрешающего обработку и регистрацию информации следующей группы датчиков.

5. Таймер (реле времени). Этот блок содержит кварцованный стабильный генератор и счетчик, обеспечивающий выдачу управляющего сигнала после окончания заданного интервала. Отсчет времени начинается в момент прихода первого импульса из очередного пакета на вход дешифратора. Этот импульс открывает вентиль, обеспечивающий подачу напряжения с кварцованного генератора на вход счетчика. После заполнения емкости счетчика (интервал времени τ_0) с его выхода подается первый управляющий сигнал на дешифратор. Счетчик при этом продолжает работать и при повторном заполнении выдает второй управляющий сигнал, при поступлении которого отсчет времени прекращается и схема подготавливается к приходу отпирающего импульса рабочего пакета. Емкость счетчика и частота генератора в таймере выбираются такими, чтобы отключение таймера происходило приблизительно в середине паузы после окончания пакета импульсов.

6. Дешифратор приемника телеметрической станции. Он осуществляет преобразование частотно модулированного сигнала в код, соответствующий измеряемой величине. Дешифратор сравнивает рабочий сигнал датчика с сигналом опорной частоты, обеспечивая таким образом коррекцию на частотные помехи тракта преобразования и передачи. Обработка сигнала в дешифраторе производится с помощью реверсивного счетчика. Коммутация входов производится логической схемой по сигналам реле времени (таймера). Входная цепь дешифратора содержит фильтр, пропускающий сигналы опорной и рабочей частот и задерживаю-

щий сигналы синхронизации и знака. В первом такте цикла дешифровки на первый вход реверсивного счетчика подается пакет импульсов N_0 с частотой опорного сигнала. Этот пакет импульсов образуется за счет выборки из опорного сигнала за время, задаваемое одним тактом таймера. Затем после паузы сигнал подается на второй вход реверсивного счетчика. На него поступает пакет импульсов $N_р = N_0 + \Delta N$ с частотой рабочего сигнала, образующийся за счет выборки из рабочего сигнала за время, задаваемое одним тактом таймера. Переключение входов реверсивного счетчика производится логической схемой по сигналам таймера.

Реверсивный счетчик запоминает величину N_0 и при подаче сигнала на второй вход осуществляет операцию вычитания $N_0 - N_р$. В момент, когда на реверсивном счетчике оказывается нуль, срабатывает индикатор нуля и остаток пакета импульсов рабочего сигнала ΔN подается в цепь выходного индикатора. Одновременно блокируется вход реверсивного счетчика, который подготавливается к приему информации по следующему каналу. Индикатор нуля представляет собой схему совпадений, число входов которой соответствует числу рабочих триггеров реверсивного счетчика.

7. Коммутатор. В приемной части телеметрической станции коммутатор по схеме и функциям полностью аналогичен этому блоку в передатчике. Выходные элементы коммутатора — магнитоуправляемые контакты — обеспечивают подключение индикаторных или накопительных счетчиков к активному узлу индикатора нуля, при включении которого на выходные индикаторы подается пакет импульсов рабочего сигнала, соответствующий измеряемому параметру (девиации частоты).

8. Система выходных счетчиков. Этот блок обеспечивает необходимое накопление информации и преобразование ее в форму, удобную для визуального представления или регистрации в цифровой форме (либо в коде для ввода в вычислительную машину). В зависимости от характера изменений измеряемых параметров во времени и типа обработки данных требуется фиксация либо мгновенных значений, либо осредненных параметров. В зависимости от этого в качестве выходных элементов применяются различные типы счетчиков. Для мгновенных значений необходимо фиксировать знак параметра и обеспечивать сброс непосредственно после отсчета. В случае когда должны регистрироваться средние значения или суммы параметров за значительные промежутки времени, знак фактического значения параметра должен учитываться автоматически при суммировании сигнала, а сигнал считывания и сброса подается от независимого блока отсчета времени. В первом случае в качестве выходных элементов используются обычные счетчики с индикатором знака, а во втором — реверсивные счетчики, в которых сигнал знака осуществляет переключение входов.

§ 3. Типовые задачи сбора и обработки информации

В заключение данного раздела рассмотрим типовые задачи сбора и обработки информации в области агрометеорологии и гидромелиорации, связанные с определением влагообеспеченности растений. Три основных типа задач решаются наиболее распространенными классами автоматизированных систем сбора информации. Такие системы достаточно универсальны и при замене датчиков могут найти широкое применение и в смежных областях.

1. **Исследования водного баланса на базе компенсационного испарителя с регулируемым уровнем грунтовых вод.**

Работы на подобной установке связаны с получением большого объема разнородной информации. В испарителях такого типа обычно устанавливается большое количество датчиков, позволяющих всесторонне характеризовать водный, солевой и температурный режимы почвенного монолита.

Для обеспечения этой программы на одном компенсационном испарителе должна быть установлена следующая аппаратура.

Датчики влажности почвы. Наиболее целесообразно применение влагопотенциометров на пористых гипсовых блоках или емкостных датчиков влажности. Необходимая точность измерений 0,5—1% влагосодержания по отношению к сухому весу. Весь комплект датчиков должен работать на один измерительный блок.

Использование радиоактивных приборов не вполне удобно, поскольку происходит непрерывная регистрация параметров во всем почвенном профиле, а вместе с тем и нежелательное облучение растений в почвенном монолите. Кроме того, при полной автоматизации измерений весьма сложно решение вопроса об автоматическом перемещении измерительного зонда в скважине и фиксации зонда на измерительном горизонте.

Количество используемых датчиков определяется глубиной почвенного монолита и поставленной задачей. Датчики, как правило, устанавливаются на 6—8 уровнях в слое 0—1 м от поверхности почвы и в среднем на 2—3 уровнях на каждом последующем метре по глубине. В особых условиях, например при образовании корки на поверхности, желателен контроль влажности в поверхностном слое почвы с шагом 5—7 см и меньше.

Датчики температуры почвы. Для подобных измерительных комплексов целесообразно использовать полупроводниковые электротермометры на основе транзисторов или термочувствительных сопротивлений. Точность измерений 0,1—0,2° С. Весь комплект датчиков должен работать на один измерительный блок.

Количество датчиков определяется необходимостью измерений на 5—7 уровнях в поверхностном слое 0—1 м, а далее с интервалом 1 м. Увеличение количества датчиков температуры почвы глубже 1 м не приводит к существенному увеличению полезной информации, так как на глубине более 1 м практически зату-

хают суточные колебания, а сезонные изменения могут быть выявлены по датчикам, установленным с достаточно большим интервалом (по глубине).

То же относится и к датчикам влажности почвы с той лишь оговоркой, что, поскольку водное питание растений идет со всего корнеобитаемого слоя, в его пределах должно быть достаточное количество датчиков для получения истинного распределения влаги с заданной точностью. Расстояние между датчиками в поверхностном слое почвы и в зоне максимальной плотности корневой системы должно быть сравнительно малым, чтобы можно было регистрировать суточные колебания.

Датчики содержания солей. В стационарных установках для этой цели наиболее удобно применять приборы, основанные на определении электропроводности почвы. Принципиально возможно совмещение измерений влажности и солености почв на одной паре электродов (в режимах измерения емкости и проводимости).

Как и в предыдущих случаях, весь комплект датчиков работает с одним измерительным блоком. Вопрос точности, так же как и проблема выбора мест установки датчиков, в данном случае решается с учетом конкретных условий: концентрации солей в модели, предполагаемой скорости и направления их переноса.

Датчики уровня грунтовых вод. Наиболее просты и чаще всего применяются датчики поплавкового типа с потенциометрическими преобразователями угол-напряжение или преобразователями угол-код. Тип преобразователя связан с системой регистрации данных. Датчики и преобразователи такого типа распространены достаточно широко. Возможно применение датчиков емкостного типа или акустических приборов. Необходимая точность измерений уровня 1—2 см.

Датчики расхода воды. Тип чувствительного элемента для этого датчика и точность измерений зависят от системы подачи и дозировки воды. При обычно применяемой в настоящее время фиксированной дозировке можно использовать датчики шагового типа, регистрирующие число подач воды равными дозами.

Датчики теплового потока в почву. Обычно применяются почвенные тепломеры таких же типов, как и при измерениях методом теплового баланса.

Чтобы установить зависимость параметров влагообеспеченности от агрометеорологических показателей, дополнительно к основному циклу измерений на единичном компенсационном испарителе для всей опытной площадки или поля надо вести измерения метеорологических параметров по общему циклу, т. е. скорости ветра, температуры и влажности воздуха на стандартной высоте над растительным покровом и радиационного баланса. Для получения этих данных можно применять контактные анемометры, электропсихрометры и радиационные ветронезависимые

балансомеры. Указанные приборы по выходным характеристикам могут включаться в общую систему регистрации.

Изменчивость измеряемых параметров такова, что осреднение во времени должно производиться в масштабах суток. Из этого вытекает программа опроса датчиков. Такие показатели, как температура и влажность почвенного монолита, должны отсчитываться не чаще чем 1—2 раза в час, а температура и влажность нижних горизонтов — 3—4 раза в сутки. Расход воды регистрируется в часовых суммах. Из всего комплекса измеряемых величин только метеопараметры приземного воздуха составляют исключение, и для них должно осуществляться почасовое интегрирование или осреднение по 10—15 отсчетам за час.

Скорость ветра измеряется по стандартным методикам Гидрометслужбы с осреднением по трем десятиминутным интервалам в час. Система сбора информации может быть построена на блок-схеме с временным разделением каналов (типа показанной на рис. 67 *а*). Для параметров, требующих повышенной частоты опроса, выделяется несколько каналов, объединяемых дополнительным коммутатором, или трансформируется программа работы основного коммутатора.

Измерительные блоки всех перечисленных датчиков устанавливаются в павильоне, в котором размещается и комплекс выходной аппаратуры, обеспечивающей выдачу информации в необходимой форме. Как правило, этот комплекс должен обеспечивать получение оперативной информации при визуальном отсчете показаний и ручную регистрацию. Кроме того, предусматривается автоматическая регистрация данных. Для этой цели наиболее широко используются в настоящее время многоточечные электронные потенциометры с регистрацией на диаграммной ленте. При такой форме представления информации необходима ручная или полуавтоматическая обработка — снятие данных с лент и составление расчетных таблиц.

Более удобно представление данных в цифровой форме. Современные многоканальные цифровые измерители позволяют отсчитывать визуально по цифровому индикатору и обеспечивают цифропечать. Выходные устройства подобной аппаратуры предусматривают подачу сигнала для регистрации данных на перфоленте в виде, удобном для ввода в ЭВМ [12].

Использование многоканальных цифровых вольтметров для регистрации данных, как правило, требует применения индивидуальных измерительных блоков в каждом канале измерений. Это обусловлено тем, что внутренний коммутатор каналов самого вольтметра не может быть использован для переключения датчиков на входах объединенных измерительных блоков. Как правило, в сочетании с цифровым вольтметром должен применяться измерительный усилитель, обеспечивающий получение необходимого уровня сигнала и заданную точность отсчета по вольтметру.

Для обработки данных, получаемых в подобных информационных системах, удобно использовать универсальную вычислительную технику.

Общая обработка включает осреднение данных в пределах заданного интервала времени, расчет влагозапаса почвенного монолита, расчет суммарного испарения по методу водного баланса. В случаях, когда нет существенных различий в состоянии растительного покрова, в испарителе и на поле возможны контрольные расчеты испарения по методу теплового баланса. Программа специальной обработки определяется конкретными задачами исследований.

2. Сбор информации с экспериментальных полей опытных баз, предназначенной для исследований влагообеспеченности и разработки критериев полива.

Комплекс такого рода представляется наиболее сложным по структуре и объему информации. В некоторых случаях он может состоять из отдельных блоков подсистемы сбора информации с компенсационных испарителей или других автономных комплексов специального назначения.

Система для экспериментального поля должна обеспечивать получение всесторонних данных о тепловом, водном и солевом режиме поля с учетом требований репрезентативности измеряемых параметров.

Для осуществления измерений на поле должны быть установлены перечисленные ниже датчики.

а) *Датчики влажности почвы.* В полевых условиях наиболее целесообразно применять влагопотенциометры с гипсовыми блоками. Работая с термовлагопотенциометрами, можно включать зонд в режиме измерений температуры, при этом отдельные датчики температуры почвы можно не использовать.

Влажность почвы целесообразно определять также радиоактивной аппаратурой. При этом не обязательно зонд перемещать в скважине — в различных точках поля зонды могут стационарно устанавливаться на фиксированных уровнях, набор которых обеспечит получение данных по всему слою водного питания растений.

Необходимая точность измерений (учитывая осреднение по площади) может быть обеспечена при случайной погрешности датчиков порядка 1—2% (абсолютного значения влажности почвы) и коррекции систематических ошибок приборов.

Комплект датчиков, устанавливаемых на поле, может работать на один измерительный блок. Допускается вариант группировки датчиков по характеристикам с использованием нескольких измерительных блоков.

Количество датчиков определяют исходя из необходимости получения репрезентативных данных для активного слоя почвы. В случае применения влагопотенциометров репрезентативность может быть обеспечена при 6—8 повторностях профилей распределения влаги в пределах одного поля. Правила размещения

датчиков по профилю те же, что для почвенных монолитов испарителя. При оценке влагосодержания в слое 1,5 м А. А. Роде рекомендует следующее распределение зон измерений: 0—10 см, 10—20, 20—40, 40—60, 60—90, 90—120, 120—150 см.

Если используются радиоактивные приборы, должны быть обеспечены измерения в зоне 0—30 см поверхностным зондом в трех повторностях и в зонах 20—60, 60—100 и 100—140 см скважинным зондом в двух повторностях.

Датчики температуры почвы. Учитывая большое число точек измерений, целесообразно применять триодные полупроводниковые электротермометры. Приборы эти имеют унифицированные чувствительные элементы и обеспечивают точность измерений порядка 0,2—0,3° С. Весь комплект датчиков может работать на один измерительный блок, а распределяются блоки по уровням на основании общих правил, принятых в Гидрометслужбе.

Репрезентативность измерений может быть обеспечена при 3—4-кратной повторности.

Выше уже отмечалось, что при использовании термовлагопотенциометров число датчиков температуры может быть уменьшено.

Датчики содержания солей. Как и в измерительной аппаратуре для компенсационного испарителя, содержание солей с помощью этих датчиков определяется по электропроводности почвы. Комплект датчиков для поля работает с одним измерительным блоком. Необходимая репрезентативность измерений может быть обеспечена при 2—3-кратной повторности. Вопрос о необходимой точности измерений, так же как и выбор уровней установки датчиков, решается с учетом реальной концентрации солей и их распределения в пределах вегетационного периода.

Комплект датчиков теплового баланса. Этот комплект, рассмотренный выше, содержит радиационный балансомер, почвенный тепломер, а также градиентомер температуры и влажности воздуха. Психрометры градиентомера устанавливаются на высотах 0,5 и 2,0 м над уровнем растительного покрова, балансомер — на высоте 2,0 м. Тепломер устанавливается в почве на глубине 2—4 см.

Как уже отмечалось, подобная аппаратура обеспечивает репрезентативность данных при линейных размерах поля порядка 300—400 м. В этих условиях тепловой баланс поля может быть охарактеризован одним комплектом датчиков, установленном в центре поля.

Датчики уровня грунтовых вод. Как и для компенсационных испарителей, здесь могут использоваться акустические датчики или поплавковые системы с преобразователями угол-напряжение или угол-код.

Для опытных полей обычно выбирается достаточно выровненный участок как по поверхности, так и по уровню грунтовых вод. При этих условиях достаточно установить один датчик уровня.

При значительных колебаниях естественного уровня грунтовых вод на участке или колебаниях, связанных с поливом, необходимо установить дополнительные датчики. Точность измерений уровня 1—2 см.

Комплект датчиков общего метеорологического цикла. В этот комплект входят датчики температуры и влажности воздуха, температуры поверхности почвы, скорости ветра, а также специальные актинометрические приборы в тех случаях, когда это необходимо по программе исследований. Для этих измерений используется дистанционная аппаратура на базе электротермометров и термоэлектрических батарей. Установка датчиков и организация наблюдений осуществляется в соответствии с общими правилами Гидрометслужбы.

Датчики расхода воды на системе полива. Типы и конструкции подобных датчиков определяются применяемой системой полива. Для напорной системы при небольшой мутности поливной воды можно использовать турбинные расходомеры или тепловые измерители скорости потоков в трубах. В открытых распределительных сетях для измерений расхода используются различные конструкции водосливов или колодцев, в которых расход определяется по изменению уровня.

Для характеристики водного баланса опытного поля необходимо измерение расхода воды, подаваемой на участок, и количества сбрасываемой воды при избыточном поливе.

При использовании всех перечисленных датчиков и тем более при их дополнении компенсационным испарителем измерительный комплекс становится настолько сложным, что не только ручная регистрация всех измеренных параметров, но и запись их на диаграммную ленту самопишущих индикаторов не обеспечивает достаточного снижения трудоемкости полной обработки данных. Сбор информации и последующую камеральную обработку можно проводить только на ЭВМ, так же как и подготавливать выдачу информации.

Нетрудно убедиться, что общее количество датчиков весьма велико. На поле должно быть установлено 45—50 датчиков влажности почвы, 15—20 датчиков температуры почвы, 5—10 датчиков солености почвы, 4 датчика в комплекте теплобалансовых измерений, 3—5 датчиков уровня грунтовых вод и расхода воды, 3—4 датчика для измерения параметров общей метеорологической обстановки. При общем количестве 75—100 датчиков они могут быть объединены в группы. На центральном наблюдательном посту сконцентрировано около 20 датчиков всех типов (за исключением датчика полива). Остальные размещаются на 6—7 дополнительных постах, на каждом из которых устанавливается от 7 до 12 датчиков. Датчики расхода воды устанавливаются изолированно, а возможно, и вообще за пределами поля.

Такой порядок размещения датчиков на поле подсказывает и наиболее рациональную структуру комплекса сбора и обработки

информации. Он должен строиться по схеме рис. 68. При распределении датчиков по группам должно учитываться не только размещение на поле чувствительных элементов, но и порядок их опроса, связанный с необходимой частотой измерений параметров.

Единая система опроса всех датчиков с максимальной частотой приводит к получению избыточной информации. При малой частоте опроса возможна потеря важной информации. Как уже указывалось, для параметров поверхностных слоев почвы достаточно проводить измерения 1 раз в час, причем для слоев почвы от 0,5 м и ниже при построении достоверного суточного хода параметров измерительный цикл должен содержать 4—6 точек. Параметры приземного слоя воздуха (включая температуру поверхности почвы) обычно должны измеряться 10—15 раз в час.

Исходя из этого, датчики центрального поста делятся на 2—3 группы с различной частотой опроса. Датчики каждого из дополнительных постов можно разделить по частоте опроса на 2 группы. Вся информационно-измерительная система содержит 7—8 групп датчиков с частотой опроса 1 раз в 4—6 часов, столько же групп с опросом 1 раз за час и 1 группу датчиков, требующих опроса 10—15 раз в час. В каждой группе может быть от 4 до 10 датчиков.

В связи с этим структурная схема системы должна содержать блоки вызова постов и групп по заданной временной программе, а каждая группа — автономный коммутатор, который обеспечивал бы поочередный опрос всех датчиков данной группы. Соответственно строится и управляющий блок системы в целом.

В качестве выходных должны использоваться цифропечатающие устройства и перфораторы. Оперативный контроль осуществляется визуально по цифровым индикаторам.

В процессе обработки полученных данных, помимо осреднения по времени, производится осреднение по площади поля (для температуры, влажности и солености почвы). Далее, по средним значениям параметров рассчитываются необходимые элементы теплового и водного баланса. Помимо этой обычной программы, дополнительная обработка предусматривает расчет различных показателей влагообеспеченности и корреляционный анализ.

Программа обработки должна обеспечивать возможность прогноза сроков и норм полива по известным расчетным схемам.

3. Сбор и обработка данных в автоматизированных системах полива сельскохозяйственных предприятий.

Информационно-измерительный комплекс промышленного применения имеет конкретное целевое назначение и является специализированным. В нем предусматривается сбор данных, способных обеспечить оперативное управление поливом. Программа работы элементов этого комплекса и набор определяемых параметров существенно уменьшены по сравнению с аппаратурой для научных исследований опытного поля.

В информационных системах, предназначенных для непосредственного использования на полях сельскохозяйственных предприятий, комплект датчиков ограничен минимально необходимым количеством элементов. В зависимости от применяемой системы полива и выбранного критерия влагообеспеченности поля в качестве датчиков могут использоваться измерители параметров влаги в почве, указатели уровня грунтовых вод, датчики элементов теплового баланса и т. п. Кроме того, в комплект датчиков систем промышленного применения должен входить расходомер воды для системы полива.

Количество датчиков в комплекте зависит от принятого метода оценки влагообеспеченности поля и может меняться от одного (для случая управления по уровню грунтовых вод) до 15—20 (для случая управления по влажности почвы). При применении гидрометеорологического коэффициента влагообеспеченности на поле устанавливаются два датчика-психрометра, включаемые в схему градиентомера.

Требования к точности измерений такие же, как и в предыдущем измерительном комплексе.

Порядок выдачи данных аналогичен информационной системе для опытного поля. Обработка информации производится по жесткой программе, выбираемой из условий временной и пространственной репрезентативности измерений в соответствии с используемым методом.

Для случаев несложной обработки в подобных комплексах может использоваться специализированная вычислительная аппаратура. Для повышения надежности методов оценки влагообеспеченности может применяться дополнительная обработка данных, позволяющая исключить возможные случайные отклонения измеряемых параметров и предотвратить ложные срабатывания системы полива.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бобин Л. П., Зусес А. Л. Преобразователь постоянного тока в частоту. Тр. АФИ, вып. 13, 1966.
2. Бобин Л. П., Зусес А. Л., Мушкин И. Г. Электронный коммутатор для телеизмерительной системы. Тр. АФИ, вып. 25, 1970.
3. Биологические основы орошаемого земледелия. Сб. статей. Изд. «Наука», М., 1966.
4. Гафуров В. К. Комплексное исследование элементов теплового и водного балансов орошаемого хлопкового поля в зоне Каракумского канала им. В. И. Ленина. Автореферат диссертации. Л., 1969.
5. Гольцман М. И. Основы методики аэрофизических измерений. Гостехиздат, М.—Л., 1950.
6. Данилин А. И. Омический метод измерения влажности почвы с применением угольных электродов в стекловолокне. Тр. НИИГМП, вып. 5, 1957.
7. Зусес А. Л., Мушкин И. Г., Чудновский А. Ф. Радиотелеметрическая агрометеорологическая установка. Тр. АФИ, вып. 16, 1968.
8. Каган Р. Л. О точности определения средней по данным точечных измерений. Тр. ГГО, вып. 175, 1965.

9. Каганов М. А., Саноян М. Г. К вопросу о точности определения испарения методом теплового баланса. Метеорология и гидрология, № 4, 1968.
10. Кащенко Л. А., Мушкин И. Г. Телеметрическая аппаратура для агрометеорологических целей. Тр. АФИ, вып. 13, 1966.
11. Клинов Ф. Я. Об автоматических метеорологических измерениях в нижнем 300-метровом слое атмосферы. Тр. ВНМС, т. 7. Гидрометеоиздат, Л., 1963.
12. Мазурин Н. Ф. Системы автоматического сбора и обработки метеорологических данных, используемые на высотных мачтах и башнях. Обнинск, 1969.
13. Материалы Междуведомственного совещания по проблеме изучения и регулирования испарения с водной поверхности и почвы. ГГИ, Валдай, 1964.
14. Огиева Т. А. О погрешностях определения затрат тепла на испарение и турбулентного потока тепла по данным наблюдений на сети станций. Тр. ГГО, вып. 174, 1965.
15. Разумова Л. А. Пространственная изменчивость и способы учета влаги на орошаемых полях. Тр. ЦИП, вып. 145, 1965.
16. Степанов Л. Н. К вопросу об автоматизации полива по информации о предполивной влажности почвы. Тр. АФИ, вып. 22, 1970.
17. Роде А. А. Основы учения о почвенной влаге, т. II. Гидрометеоиздат, Л., 1969.
18. Слейтер Р., Макилрой И. Практическая микроклиматология. Пер. с англ. под ред. С. А. Вериго и С. А. Сапожниковой. Изд. «Прогресс», 1964.
19. Смирнова С. И. Пространственная изменчивость агрометеорологических элементов. Тр. ИЭМ, вып. 8, 1969.
20. Холмс И. В. Вопросы измерения влажности почвы в аридных условиях. Сб. статей «Климатология и микроклиматология». Пер. с англ. под ред. В. С. Самойленко. Изд. «Прогресс», М., 1964.
21. Чжоу Минь Юй. Оптимальные периоды осреднения при измерениях метеорологических полей. Изв. АН СССР, сер. «Физика атмосферы и океана», т. 2, № 5, 1966.
22. Petersen D. P., Midleton D. On representative observations. Tellus, 15, 4, 1963.
23. The collection and pocessing of field data. ACSIRO simposium, 1966.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Значение оценок влагообеспеченности сельскохозяйственных полей очевидно, а сложность экспериментального осуществления таких оценок известна всем, кто так или иначе интересовался этой проблемой. Повышенное внимание к вопросам влагообеспеченности в последнее время в значительной мере связано с тем, что все больший круг специалистов привлекается к решению задач автоматизации оросительных систем и к выяснению фундаментальных вопросов переноса тепла и влаги в системе почва — растение — приземная атмосфера.

Темпы развития производства настоятельно требуют быстрой передачи для практического применения результатов научных исследований. Эффект такой передачи будет максимальным в тех случаях, когда результат исследований может быть представлен в виде технологического процесса. Здесь можно говорить о внедрении на системах регулирования водного режима растений и сельскохозяйственных полей совершенных критериев оценки влагообеспеченности и методов определения таких критериев, которые могли бы обеспечить оперативное управление условиями развития растений.

Без определения потребности в подаче воды невозможно технически обоснованное управление поливом вообще, а тем более автоматическое управление. Правильный выбор показателя, по которому определяется фактическая влагообеспеченность растений, так же как и выбор значения критерия, свидетельствующего о необходимости полива, предопределяет по существу успех и экономичность технических решений в аппаратуре автоматического управления поливом. Неверные или приблизительные решения могут привести к ошибочному выводу о невозможности полной автоматизации или так усложнят систему, что она станет практически нереализуемой. Последнее может быть связано не только с трудностями получения и обработки информации, но и с помехами нормальной обработки сельскохозяйственных полей из-за размещения на поле значительного количества датчиков системы и сопутствующих вспомогательных элементов.

В настоящий момент нельзя дать определенный ответ на вопрос об эффективном критерии влагообеспеченности, а фундаментальные исследования не продвинулись дальше полукачественных описаний процессов переноса. Анализ предельно упрощенных моделей в данном случае не дает достаточных оснований для практических рекомендаций. Необходимость статистических оценок достоверности искомых параметров или критериев, связанных с этими параметрами, вносит в решение поставленной задачи дополнительные трудности, тем более, что вопросы репрезентативности измерений изучены относительно слабо. Это относится в первую очередь к имеющимся методам определения показателей, которые в принципе могли бы использоваться для оценки влагообеспеченности.

Для правильного выбора показателя влагообеспеченности особенно важно получение материалов по сравнительной репрезентативности конкретных методов определения потребности растений во влаге. Можно предполагать, что именно этим проблемам в ближайшие годы будет уделяться наибольшее внимание.

Помимо фундаментальных исследований процессов переноса, на основе которых можно построить технологические схемы оценок влагообеспеченности, возможен и эмпирический подход. В последнем случае анализу подвергаются данные экспериментов по реализации различных методов оценки влагообеспеченности.

Постановка массовых исследований тепло- и массообмена в системе почва — растение — приземная атмосфера с привлечением современных автоматизированных систем сбора и обработки информации позволит в относительно короткие сроки выработать практические рекомендации, которые смогут лечь в основу проектирования автоматических комплексов управления поливом в соответствии с потребностями растений на поле. С другой стороны, развитие таких работ, окончательный выбор наиболее совершенных критериев влагообеспеченности и гаммы практически реализуемых автоматизированных методов будут способствовать не только разрешению практических проблем управления поливом, но и решению теоретических задач переноса.

Хотелось бы надеяться, что материалы этой книги окажутся полезными ученым и практикам и будут способствовать развитию работ по оценкам влагообеспеченности сельскохозяйственных полей.

SUMMARY

The problem of estimation of water consumption for a single plant or the whole field is of great interest for scientists and specialists engaged in agriculture. This problem includes a wide list of aspects concerning estimation of water availability for plants.

The essential functions of water in plant physiology, besides direct participation in photosynthesis and nutrient transfer, are thermocontrol and diversion of extra energy. Analysis of water availability is a very difficult task because of the movement of water through such a complex system as soil. The estimation of water consumption is based on different parameters or factors which determine the accessibility of water to the plants. The amount of water required for each plant depends upon the particular properties of individual plants and environment conditions.

The most adequate way of estimation of water availability involves taking into account the intensity of physiological processes which provide the accumulation of useful products in the crop. It is possible also to take account of various factors which characterize the general condition of plants (transpiration, cell moisture concentration, etc.), which are not directly connected with final products of photosynthesis.

The first chapter of the book deals with a review of biological methods of water availability estimation and the description of measuring devices. Water feeding of plants can be evaluated with soil moisture parameters. Soil moisture potential defines the amount of work which is needed to transport water from the soil to leaves. The known methods of soil moisture determination are discussed from this point of view in the second chapter.

Some hydrometeorological parameters (evaporation, for example) may also be used for water availability estimation. The values of these parameters depend on the whole system of conditions for plants development, though these characteristics are not directly connected with photosynthesis or soil moisture availability. In the third chapter there is a description of hydrometeorological parameters and diagrams of modern instruments which determine these factors.

The fourth chapter concerns the aspects of representativity of above mentioned methods and the analysis of their adequate application. The measuring method may be useful or useless for solution of the problem under discussion, it depends upon local conditions of measurements and inertia of processes to register. For example, physiological characteristics may be used for vegetation studies in laboratories.

The soil moisture indices are to be used for water availability estimation in greenhouses or on small plots. Hydrometeorological parameters can be used on agricultural strips several hundred meters long.

The data which have been obtained can be of value not only for scientific researches, but also can be used for practical application of watering control.

As a result of lack of data on water exchange the most important problem is working out a perfect method of data collection and its processing. Modern automatic instruments using adequate methods of estimation are to provide not only the solution of scientific problems, but are also to be the basis of complex systems, which are now being investigated for watering automatisation. The main aspects of automation of measurements and treatment of water availability estimation are discussed in the fifth chapter. This chapter also deals with the discussion of the most important problems of general data collection.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие 3
Введение 5

Глава I. **Биологические методы диагностики влагообеспеченности растений** 10

§ 1. Водный баланс растений 11
§ 2. Транспирация и температура листа 17
§ 3. Измерение транспирации и температуры листьев 22
§ 4. Концентрация клеточного сока и сосущая сила листа 29
§ 5. Тургорное давление и скорость течения сока 33
§ 6. Методы определения количества влаги в органах растения и скорости сока в стебле 38
§ 7. Параметры, характеризующие развитие растений 44
§ 8. Методы оценки динамики изменений фотосинтеза 50
§ 9. Биологические оценки влагообеспеченности растений при управлении поливом 54

Глава II. **Физические показатели наличия доступной растению почвенной влаги** 64

§ 1. Влага в почве 64
§ 2. Параметры, связанные с доступностью почвенной влаги 69
§ 3. Методы определения потенциала влаги в почве 72
§ 4. Основы измерительных методов 78
§ 5. Весовые методы оценки влагосодержания почвы 80
§ 6. Связь электрических характеристик с влажностью почвы 85
§ 7. Электрические методы оценки влагосодержания почвы 89
§ 8. Связь теплофизических характеристик с влажностью почвы 98
§ 9. Определение влажности почвы по теплофизическим характеристикам 101
§ 10. Взаимодействие радиоактивного излучения с почвенной влагой . . 104
§ 11. Радиоактивные методы определения влагосодержания почвы . . . 108
§ 12. Применение показателей влагосодержания почвы для управления поливом 119

Глава III. **Расчетные методы оценки влагообеспеченности** 127

§ 1. Агрометеорологические показатели приземного слоя воздуха 128
§ 2. Основные методы измерения испарения 143
§ 3. Погрешность расчетных методов определения агрометеорологических показателей влагообеспеченности 146

§ 4. Комплект датчиков теплового баланса 153
§ 5. Специализированные установки для расчета элементов теплового баланса 160
§ 6. Пульсационный метод измерения испарения 170
§ 7. Аппаратура для определения испарения пульсационным методом . . 172
§ 8. Параметры водного баланса поля 180
§ 9. Аппаратура для измерения элементов водного баланса 183
§ 10. Аппаратура для оценки интенсивности фотосинтеза по потоку углекислого газа 192
§ 11. Использование агрометеорологических оценок влагообеспеченности сельскохозяйственного поля для управления поливом 194

Глава IV. **Репрезентативность оценок влагообеспеченности** 209

§ 1. Репрезентативность во времени и в пространстве 209
§ 2. Репрезентативность и необходимая методика организации наблюдений 214
§ 3. Области применения различных методов определения влагообеспеченности 222

Глава V. **Автоматизация измерений и обработки информации при оценках влагообеспеченности растений и сельскохозяйственных полей** . . . 226

§ 1. Структурные схемы систем сбора информации 226
§ 2. Элементы информационных систем 232
§ 3. Типовые задачи сбора и обработки информации 242

Мушкин Иосиф Григорьевич

ВЛАГООБЕСПЕЧЕННОСТЬ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ПОЛЕЙ

Ответственный редактор А. Ф. Чудновский

Редактор А. Б. Котиковская
Художник В. А. Каралкин
Худ. редактор И. П. Кошаровский
Техн. редактор И. К. Пелипенко
Корректоры: Г. Н. Римант и Л. И. Хромова

Сдано в набор 12/I 1971 г. Подписано к печати 11/III 1971 г. Бумага тип. № 1. 60×90¹/₁₆. Бум. л. 8. Печ. л. 16. Уч.-изд. л. 17,75. Тираж 1400 экз. М-25103. Индекс АГ-11.
Гидрометеорологическое издательство. Ленинград, 2-я линия, д. 23.
Заказ № 26. Цена 1 р. 44 к.

Ленинградская типография № 8 Главполиграфпрома Комитета по печати при Совете Министров СССР. Ленинград, Прачечный пер., д. 6.