М. А. БЕРЛИНЕР

ИЗМЕРЕНИЯ ВЛАЖНОСТИ

Издание второе, переработанное и дополненное

«ЭНЕРГИЯ»
Москва · 1973

6П2.1.081
Б 49
УДК 621.317.39:543.712

Берлинер М. А.

Б 49 Измерения влажности. Изд. 2-е, перераб. и доп. М., «Энергия», 1973.

400 с. с ил.

В книге рассматриваются теоретические основы электрических и других физических методов измерения влажности твердых материалов, жидкостей и газов, характеристики и конструкция датчиков и измерительных устройств влагомеров и гигрометров, а также метрологическое обеспечение этих приборов.

Книга рассчитана на инженерно-технических и научных работников, занимающихся разработкой влагомеров и гигрометров и измерениями влажности в различных отраслях науки и техники; а также на аспирантов и студентов высших учебных заведений, специализирующихся в области измерительной техники и автоматизации производственных процессов.

Б $\frac{3313\text{-}191}{051(01)\text{-}73}$ 182-73 6П2.1.081

© Издательство «Энергия», 1973 г.

Берлинер Марк Александрович

Измерения влажности

Редактор *Г. И. Биргер*
Редактор издательства *Л. Н. Синельникова*
Переплет художника *Е. В. Никитина*
Технический редактор *Г. С. Юдаева*
Корректор *И. А. Володяева*

Сдано в набор 25/XII 1972 г. Подписано к печати 15/VIII 1973 г. Т-13947
Формат 84×108¹/₃₂ Бумага типографская № 2
Усл. печ. л. 21,0 Уч.-изд. л. 23,4
Тираж 8000 экз. Зак. 1507 Цена 1 р. 32 к.

Издательство «Энергия». Москва, М-114, Шлюзовая наб., 10.

Московская типография № 10 Союзполиграфпрома
при Государственном комитете Совета Министров СССР
по делам издательств, полиграфии и книжной торговли.
Москва, М-114, Шлюзовая наб., 10.

ПРЕДИСЛОВИЕ

Методы измерения влажности твердых материалов, жидкостей и газов, основанные на преобразовании влажности в другую физическую величину с использованием современной измерительной техники, насчитывают всего несколько десятилетий; некоторые из них были разработаны в последние годы.

Однако измерения влажности различных материалов и средств во многих отраслях народного хозяйства и целом ряде областей научных исследований заняли важное место в современной аналитической измерительной технике. Информация о влажности используется в многочисленных автоматических системах (системы управления и информационно-измерительные).

Автор поставил перед собой задачу отразить современный уровень знаний в области измерений влажности электрическими и другими физическими методами. Для этого использован отечественный и зарубежный опыт разработки и применения влагомеров (приборов для измерения влажности твердых материалов и жидкостей) и гигрометров (приборов для измерения влажности газов) различных типов, а также выполненные автором работы.

Настоящая монография является вторым изданием книги «Электрические измерения, автоматический контроль и регулирование влажности» (издательство «Энергия», 1965 г.). В нее введены новые главы и параграфы, а материал остальных глав и параграфов в значительной степени переработан и обновлен. Исключен имевшийся

в издании 1965 г. раздел, посвященный системам автоматического контроля и регулирования, основанным на информации о влажности.

Книга состоит из трех частей. В первой рассматриваются измерения влажности твердых материалов и жидкостей, во второй — газов, третья посвящена общим вопросам измерений при всех агрегатных состояниях тела, в частности их метрологическому обеспечению.

Автор считает своим долгом выразить признательность Г. И. Биргеру за участие в редактировании книги, а также читателям и организациям, высказавшим свои мнения и пожелания по предыдущему изданию книги.

Отзывы и замечания по настоящей книге можно направлять по адресу: 113114, Москва, М-114, Шлюзовая наб., 10, издательство «Энергия».

Автор

ВВЕДЕНИЕ

Влага является одним из обязательных компонентов всех живых организмов на земле, окружающей нас биосферы, а также большинства материалов, используемых человеком. Содержание влаги в окружающей среде оказывает влияние на характер и интенсивность происходящих в живых объектах биохимических и физико-химических процессов. От влажности зависят физические, химические, механические и технологические свойства значительной части неметаллических материалов. Почти во всех отраслях промышленности, в сельском хозяйстве, энергетике и строительстве применяются процессы сушки и увлажнения, предназначенные для изменения влажности материалов. Поэтому количественное определение влажности твердых материалов, жидкостей и газов необходимо почти во всех отраслях народного хозяйства, в метеорологии, в научных исследованиях, связанных со многими областями знаний.

В сельском хозяйстве влажность почвы обусловливает целесообразность применения тех или иных агротехнических приемов. Полевые агрономические исследования пахотного слоя почв нужны для правильного определения сроков начала пахоты, внесения удобрений. Контроль влажности почв необходим для правильного ведения орошения земель — определения сроков и продолжительности поливов, управления автоматизированными оросительными системами. Влажность зерна, табачных листьев, хлопка и других сельскохозяйственных продуктов является одним из основных факторов, определяющих возможность длительного хранения без порчи и потерь этих материалов. Всхожесть семенных материалов в большой мере зависит от их влажности в процессе хранения. При переработке зерна от его влажности зависят сопротивление измельчению и, следовательно, удельный расход энергии и производительность мельничного оборудования. Величина влажности зерна и дру-

гих сельскохозяйственных продуктов учитывается при сдаче и приемке, так как от нее зависит их чистый вес, т. е. действительная стоимость.

В строительстве от влажности зависят основные свойства строительных материалов, теплофизические, теплозащитные и прочностные характеристики строительных сооружений, конструкций и ограждений и, следовательно, их долговечность, надежность и эксплуатационные качества.

В промышленности влажность сырья и полуфабрикатов оказывает большое влияние на качество продукции и производительность оборудования. В ряде отраслей промышленности (текстильной, легкой, пищевой, химической и др.) основные технологические процессы тесно связаны с изменениями влажности обрабатываемых материалов.

При исследовании материалов органического происхождения (древесина и другие растительные материалы, животное сырье) контроль влажности необходим почти на всех этапах технологического процесса: при хранении, сдаче-приемке и транспортировке сырья и готовой продукции.

Важнейшее практическое значение имеет измерение влагосодержания неводных жидкостей — углеводородов, растительных и минеральных масел, нефтей и нефтепродуктов, авиационных и ракетных топлив. Контроль влажности нефти необходим в процессах ее добычи, хранения, транспортировки и переработки. Информация о содержании пластовой воды в сырой нефти нужна для управления процессами ее откачки. В топливах для реактивных двигателей содержание влаги не должно превышать тысячных долей процента во избежание опасностей, связанных с образованием льда в коммуникациях двигателя.

Необходимость контроля влагосодержания жидких топлив для ракет, содержащих сильные окислители [Л. 2-1], вызвана опасностью коррозии деталей, соприкасающихся с топливом. Аналогичные ограничения предельного допустимого влагосодержания действительны и для хладагентов современных холодильных установок.

Весьма разнообразны задачи, связанные с измерениями влажности воздуха, газов и газовых смесей. Влага во всех трех формах является одной из наиболее важных составных частей земной атмосферы, причем ее со-

держание изменяется в широких пределах во времени и пространстве. Содержание водяного пара в приземном слое атмосферы — это один из важнейших метеорологических элементов (параметров состояния) атмосферного воздуха, которые измеряются сетью станций гидрометеорологической службы. Для прогнозирования погоды и изучения путей воздействия на климат необходима также информация о влагосодержании верхних слоев атмосферы и о вертикальном распределении (вертикальных профилях) водяного пара.

Влажность воздуха является одним из основных технологических параметров в установках кондиционирования воздуха, вентиляционных, сушильных и холодильных. В жилых и производственных помещениях и в общественных зданиях влажность воздуха — это один из факторов, определяющих самочувствие человека и условия комфорта для него. Регулирование влажности воздуха (наряду с другими его параметрами) необходимо во всех установках для создания искусственного климата, начиная с лабораторных камер-гигростатов вплоть до современных фитотронов, а также в книгохранилищах, музеях — для создания оптимальных условий хранения книг и экспонатов.

В промышленности актуальны задачи контроля и регулирования влажности воздуха в складских и производственных помещениях, связанных с гигроскопическим сырьем, полуфабрикатами и готовыми изделиями (пищевая, текстильная, бумажная, полиграфическая, кино-фотоматериалов и др. отрасли промышленности), на некоторых машино- и приборостроительных предприятиях (для предотвращения коррозии изделий, создания необходимых условий при сборке и испытаниях приборов), в промышленности полупроводниковых материалов и приборов, электронной и т. д. Поддержание определенной влажности необходимо в ряде биологических процессов (например, в микробиологической промышленности, в процессах ферментации табака). Аналогичные задачи возникают и в сельском хозяйстве — при выращивании растений в закрытом грунте (теплицы, оранжереи), в животноводстве и птицеводстве — в инкубаторах и помещениях для содержания скота, продуктивность которого зависит от влажности окружающего воздуха, в зернохранилищах и помещениях для хранения и дозревания овощей и фруктов.

Технологические процессы химической промышленности выдвигают задачи контроля и регулирования влагосодержания чистых газов: азота, водорода, кислорода, метана и др., во многих случаях необходимо контролировать с большой точностью степень осушки воздуха и различных газов. Аналогичные задачи выдвигают современные электровакуумная промышленность и металлургия (черная, цветная, в том числе редких металлов и полупроводников); в качестве примеров можно указать на контроль влажности доменного дутья и на контроль влажности водорода при производстве твердых сплавов. Влагосодержание водорода и других инертных газов доводится до ничтожно малых величин и в процессах термической обработки некоторых металлов и сплавов (термообработка в контролируемых печных атмосферах).

Общеизвестно влияние влажности газов, транспортируемых по газопроводам, на условия эксплуатации и коррозию трубопроводов. От влажности газообразного топлива зависит его теплотворная способность.

Не менее обширен круг задач, связанных с измерениями влажности в научных исследованиях в самых различных областях, как, например, медицина и биология, биохимия и физическая химия, физиология растений, метеорология и аэрология, почвоведение и агрохимия, тепло- и массообмен и ряд технических наук (теория и техника процессов сушки, гидрология, гидротехника и мелиорация, различные области строительства и т. д.).

Приведенный перечень далеко не исчерпывает всех применений измерений влажности в науке и технике и лишь характеризует обширную сферу применения этих измерений, с которой связаны следующие особенности:

а) большое научное, техническое и экономическое значение для жизни общества этой отрасли измерительной техники;

б) широкий диапазон задач и разнообразие требований, предъявляемых к техническим средствам измерения влажности.

Экономический эффект, который может получить народное хозяйство от повсеместного и достаточно точного контроля влажности используемых материалов, воздуха и газов, чрезвычайно велик. Оценить его в денежном выражении трудно, в частности потому, что в большинстве случаев экономия достигается в результате не самого

получения информации о влажности, а целенаправленного использования этой информации.

В качестве основных источников экономии, обусловленной получением информации о влажности или усовершенствованием этой информации, могут рассматриваться:

а) устранение или сокращение непроизводительных материальных потерь, обусловленных отсутствием информации о влажности, ее неточностью или несвоевременным получением. Сюда относятся потери от порчи зерна, хлопка и других сельскохозяйственных продуктов, а также материалов других видов (например, угля) в процессе их хранения и переработки, потери от коррозии металлов, от уменьшения теплотворной способности топлив (твердых, жидких и газовых). Существенную экономию дает устранение транспортирования воды вместо сухого продукта, особенно при перевозке массовых грузов (зерно, уголь, руда, нефтепродукты, строительные материалы). Определенный эффект связан также с ликвидацией аварий и отказов оборудования при транспортировании газового топлива и использовании жидких (авиационных) топлив. Некоторые цифровые данные, характеризующие указанные источники экономии в масштабах СССР, приведены в [Л. В-1 и В-2];

б) улучшение технико-экономических показателей производственных процессов, для которых влажность (обрабатываемого сырья, продукции, используемой или окружающей жидкой или газовой среды) является существенным влияющим параметром. В таких процессах контроль и в первую очередь автоматическое регулирование влажности позволяют повысить качество продукции и производительность оборудования, уменьшить расход сырья, топлива и энергии, сократить брак и потери. Особенно большой эффект могут дать системы автоматической оптимизации производственных процессов, которые основаны на информации о влажности обрабатываемого материала и на экономических или технико-экономических критериях оптимальности (максимизация производительности, минимизация стоимости продукции); такие системы были осуществлены в последние годы, в частности, для процессов сушки [Л. 0-1];

в) увеличение производительности труда благодаря регулированию влажности (наряду с другими параметрами) окружающего воздуха. К этому следует добавить

эффект от регулирования влажности воздуха в жилых и общественных помещениях, в лечебных учреждениях, на транспорте («комфортное» кондиционирование воздуха), который нельзя оценить в рублях, но значение которого для самочувствия и здоровья людей очевидно;

г) замена ручных аналитических определений влажности, выполняемых в массовом масштабе целой армией лаборантов, измерениями с помощью инструментальных средств. Благодаря быстродействию и другим достоинствам последних достигается значительное сокращение трудовых затрат, расхода энергии и т. п.; однако главным источником экономии является возможность оперативного использования информации о влажности для воздействия на производственные процессы, а также выполнение измерений в тех объектах, для которых применение лабораторных аналитических методов невозможно или вызывает большие затруднения.

Измерения влажности имеют многолетнюю историю. Устройства для количественной оценки влажности воздуха появились уже в XV в., а создание волосного гигрометра можно отнести к 1783 г. Аналитический способ определения влагосодержания твердых тел взвешиванием до и после высушивания образца применяется уже на протяжении многих десятилетий, кондуктометрический метод был предложен в начале двадцатого столетия, а диэлькометрический — примерно в 1928 г.

Однако в связи с научно-техническим прогрессом коренным образом изменились в последние десятилетия задачи измерений влажности и требования, предъявляемые к ним [Л. В-3].

Важнейшими из этих требований явились уменьшение длительности определения и возможность выполнения всех или основных операций измерения без участия человека, т. е. переход от ручного аналитического контроля к методам современной измерительной техники.

Влагомеры и гигрометры нашли применение в системах управления и измерительно-информационных различных отраслей промышленности, сельского хозяйства, строительства и в научных исследованиях, а гигрометры — также в дистанционных информационно-измерительных системах метеорологии и аэрологии. Автоматические метеорологические станции, радиозонды, самолеты — летающие лаборатории, метеорологические ракеты и спутники потребовали новых, более совершенных

средств измерения влажности атмосферы. С этим связаны новые или повышенные качества, которыми должны обладать влагомеры и гигрометры и особенно их датчики как составные элементы автоматических систем: высокая надежность и связанное с ней минимальное количество движущихся частей, совершенные динамические характеристики, взаимозаменяемость, минимальные габариты и вес.

Метрологические требования не ограничиваются высокой точностью и чувствительностью; характерными для измерений влажности являются чрезвычайно широкие диапазоны измерений, охватывающие несколько порядков измеряемой величины. У влагомеров нижний предел измерений может исчисляться тысячными долями одного процента (влажность жидких углеводородов, топлив) или десятыми долями (алюмосиликатные катализаторы, пигменты, фторопласт и другие полимерные синтетические материалы); верхний предел может быть близок к 100%, например в растениях и других биологических объектах, содержащих воду в количестве 50—80% общей массы.

Измерения влагосодержания газов необходимо выполнять в пределах от микроконцентраций — одной или нескольких миллионных долей (контроль влажности чистых газов, современные процессы синтеза полимеров) — до насыщения.

Для гигрометрии характерны изменения в широком диапазоне и других параметров объекта измерения — температуры, давления (для газов — от нескольких миллиметров ртутного столба до сотен атмосфер), наличия примесей и загрязнений.

Рассмотрим подробнее некоторые задачи измерений влажности, относящиеся к наиболее сложным:

а) Для научных исследований во многих областях, а также для решения некоторых практических задач необходимы локальные измерения влажности твердых тел или газов, т. е. получение информации не об интегральных значениях влажности, а об ее распределении в отдельных точках исследуемой среды.

б) Измерение влажности воздуха и газов при низких отрицательных температурах. Указанная задача — одна из наиболее сложных в метеорологии — сейчас актуальна для холодильной промышленности и для ряда областей науки.

в) Контроль и регулирование влажности паровоздушной смеси или газов при высоких температурах. Эта задача возникает в хлебопекарных печах и обжарочных камерах в пищевой промышленности, в промышленных печах, например в печах для закалки и обжига некоторых качественных сталей, на тепловых электростанциях (контроль влажности дымовых газов) и т. д.

В ряде случаев задача дополнительно усложняется наличием в контролируемой газовой среде значительного количества взвешенных частиц (например, контроль влажности дымовых газов для коптильных установок).

г) Измерение влагосодержания газов, находящихся в замкнутых оболочках при высоких давлениях; в этих условиях необходимо учитывать влияние сжатия газа на его физические свойства, в частности на максимальную возможную упругость водяного пара.

Сложность и разнообразие задач делают весьма проблематичной возможность создания универсального метода измерения влажности даже для тел одного агрегатного состояния. Рассмотренные задачи невозможно решить с помощью традиционных методов и технических средств гигрометрии или аналитических определений влажности твердых материалов и жидкостей. Для их решения пришлось разработать новые (или привлечь известные в других областях) физические методы измерения, в частности основанные на использовании различных участков спектра электромагнитных колебаний.

На рис. В-1 приведены данные, иллюстрирующие динамику развития этих методов. Характерным является закономерный сдвиг в направлении коротковолновой области спектра — тенденция, проявляющаяся и в других областях исследования состояния и состава вещества.

Создание и применение «инструментальных» методов оказали большое влияние на теоретические основы и технику измерений влажности. Эти измерения превратились в одну из областей современных измерений состава и свойств материала. Разработка и выпуск влагомеров и гигрометров представляет собой сейчас одну из отраслей аналитического приборостроения.

Для нее характерны направления развития, общие для современного приборостроения: миниатюризация, типовое проектирование на блочно-модульной базе

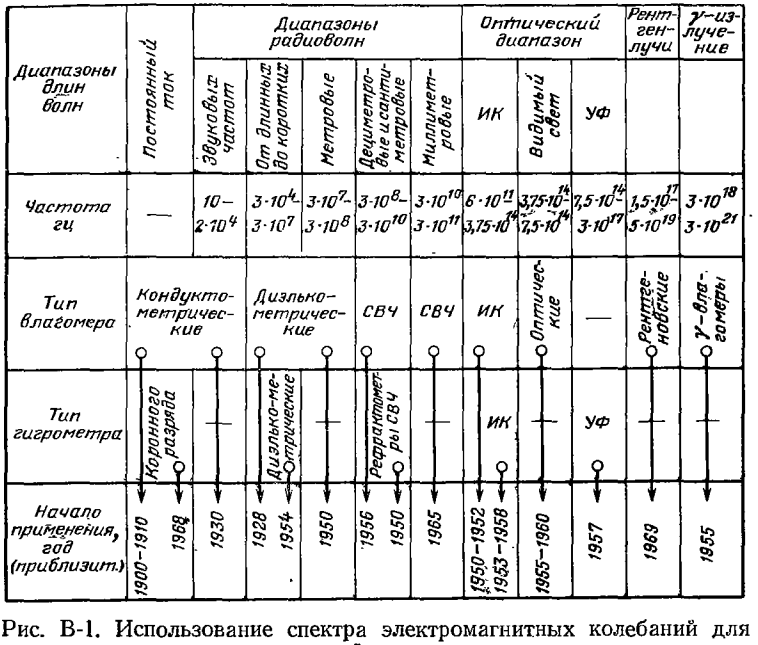


Рис. В-1. Использование спектра электромагнитных колебаний для измерений влажности.

с применением интегральных цифровых и микромодульных аналоговых элементов и главное — унификация и стандартизация средств измерения.

Высшей формой унификации и стандартизации в приборостроении, основанной на системном подходе, является разработка агрегатных комплексов, в частности агрегатного комплекса средств аналитической техники (АСАТ), который охватывает и средства измерения влажности.

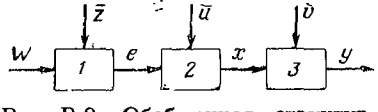


Рис. В-2. Обобщенная структурная схема влагомеров и гигрометров.

Для анализа и синтеза влагомеров и гигрометров удобно пользоваться обобщенной структурной схемой в виде последовательного соединения трех звеньев (рис. В-2) [Л. В-4]. Звено *1* описывает связь «состав — свойство», т. е. преобразование влагосодержания W (оцениваемого одной из принятых единиц измерения)

в физическое свойство e контролируемого материала, используемое для измерения влажности. Характер величины e зависит от принятого метода измерения, например: в электрических методах e может представлять собой вещественную и мнимую составляющие комплексной диэлектрической проницаемости материала, в оптических — оптическую плотность прошедшего или отраженного излучения определенной длины волны и т. д. Указанное преобразование характеризует существующую в природе зависимость физических или физико-химических свойств вещества от содержания влаги. Звено *2* — первичный измерительный преобразователь, на выходе которого получают полезный выходной сигнал x, удобный для дальнейшей обработки. Звено *3* соответствует измерительному устройству, сравнивающему величину x с мерой этой величины и дающему выходной сигнал y прибора — отклонение стрелки указателя, унифицированный электрический или пневматический сигнал системы ГСП и т. п.

Возмущающими воздействиями являются: для звена *1* — z, т. е. изменение состояния и свойств материала, помимо влажности (температура, плотность, химический состав); для звена *2* — u, т. е. изменение условий измерения (частота электрического поля, масса образца и его положение); для звена *3* — помехи v, воздействующие на измерительное устройство.

В общем случае имеется несколько параметров z, u, v, и их удобно считать координатами векторов ($\bar{z}=z_1, z_2, z_3, \ldots, z_n$ и т. д.); иногда это относится и к величине e.

В структурных схемах реальных приборов для измерения влажности звенья *1, 2, 3* заменяются несколькими элементарными преобразователями с различными способами соединения.

Согласно схеме (рис. В-2) можно выделить две основные составные части влагомеров и гигрометров: датчик и измерительное устройство. Под датчиком подразумевается конструктивная совокупность преобразователей *1* (в большинстве случаев этот преобразователь не реализуется в виде отдельного функционального элемента) и *2*, устройств для введения в преобразователь исследуемого материала, его перемещения и выгрузки; а также дополнительных устройств для получения информации о значениях внешних влияющих воздействий z,

u или для стабилизации и компенсации этих воздействий.

В автоматических влагомерах и гигрометрах функционирование (непрерывное или дискретное) датчика и измерительного устройства не требует участия человека. В неавтоматических приборах операции, необходимые для выполнения измерения, или их часть (загрузку и выгрузку образца, уравновешивание измерительного устройства) выполняет оператор; эти приборы, как правило, рассчитаны на дискретное действие.

Метрологическая и информационная оптимизация любого влагомера или гигрометра сводится к требованию наилучшего выделения полезного сигнала из его смеси с шумами.

Изменение выходного сигнала y (см. рис. В-2) описывается уравнением

$$dy = \frac{\partial y}{\partial W} dW + \frac{\partial y}{\partial z} dz + \frac{\partial y}{\partial u} du + \frac{\partial y}{\partial v} dv. \qquad \text{(В-1)}$$

Назначением влагомера, как и любой информационной системы, является наилучшее пропускание полезного сигнала $(\partial y/\partial W)dW$ при максимальном подавлении помех, описываемых остальными составляющими правой части уравнения (В-1). Минимизация погрешности достигается при условии, что чувствительность влагомера к изменениям влажности $S_W = \partial y/\partial W$ максимальна, а чувствительность к помехам $S_п = \partial y/\partial z + \partial y/\partial u + \partial y/\partial v$ минимальна.

Список литературы, приведенный в конце книги, включает, кроме источников, относящихся к отдельным главам, также перечень основных работ, относящихся к теме книги в целом.

ЧАСТЬ ПЕРВАЯ

ИЗМЕРЕНИЯ ВЛАЖНОСТИ ТВЕРДЫХ МАТЕРИАЛОВ И ЖИДКОСТЕЙ

Глава первая

ВЛАЖНОСТЬ МАТЕРИАЛОВ И МЕТОДЫ ЕЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ

1-1. ВЛАГА В ТВЕРДЫХ МАТЕРИАЛАХ И ЖИДКОСТЯХ

Вода обладает целым рядом особенностей строения и физико-химических свойств; одной из ее аномалий является, например, очень высокая диэлектрическая проницаемость. Эти особенности (подробно рассматриваемые ниже) используются для измерений влажности.

Содержащие влагу материалы представляют собой многокомпонентные гетерогенные системы, в которых один из компонентов (вода) может находиться в различных фазовых состояниях. При измерениях влажности необходимо принимать во внимание физико-химические свойства системы, которые определяются свойствами твердого скелета материала, количеством и свойствами влаги.

В неводных жидкостях, например жидких углеводородах, содержатся следующие виды влаги: а) свободная; б) растворенная (связанная); в) диспергированная.

Свободная вода легко выделяется отстоем или с помощью фильтров. В неполяриых жидкостях, особенно углеводородах, количество растворенной воды крайне незначительно; растворимость воды и скорость растворения увеличиваются с повышением температуры. Основным объектом измерений является содержание диспергированной воды, образующей, например, с нефтями и нефтепродуктами эмульсию — дисперсную систему, в которой дисперсионной средой служит нефть, а дисперсной фазой — вода.

Водонефтяные эмульсии, как и большинство реальных эмульсий, являются не монодисперсными, а полидисперсными системами. По степени дисперсности (размерам частиц воды) эмульсии можно разделить на три группы: а) грубодисперсные (раднус частиц $r = 25 \div 50$ *мкм*); б) среднедисперсные ($r = 10 \div 25$ *мкм*); в) тонкодисперсные ($r = 0{,}1 \div 10$ *мкм*).

По данным [Л. 1-1] функция распределения частиц воды в водонефтяной эмульсии по размерам, определенная методами седиментации в гравитационном поле и микрофотографированием, хорошо аппроксимируется Г-функцией. Степень дисперсности является первым свойством эмульсии, имеющим существенное значение для различных физических методов определения ее влагосодержания. В ряде методов влияющим фактором является также форма дисперсных частиц — степень их отклонения от идеальной, сферической формы.

Вторым параметром эмульсий, важным для влагометрии, является их устойчивость, зависящая от природы углеводорода, наличия поверхностно-активных веществ (эмульгаторов) на границе дисперсной фазы, концентрации воды и температуры эмульсии.

Устойчивость эмульсии зависит от способа ее подготовки, в частности от длительности эмульгирования. Этот фактор влияет также на степень дисперсности эмульсии; увеличение времени эмульгирования сдвигает максимум функции распределения в сторону мелкокапельной фракции и одновременно повышает монодисперсность эмульсии.

Недостаточная устойчивость эмульсии влечет за собой ее расслоение — под действием сил тяжести дисперсные частицы опускаются вниз и содержание воды в верхних слоях эмульсии становится меньшим, чем в нижних.

Из других факторов, роль которых возрастает при определении малых влагосодержаний, отметим наличие примесей в жидкости — механических и газовых (пузырьков воздуха). На электрические параметры эмульсий существенное влияние оказывает содержание электролитов, например степень минерализации воды в водонефтяных эмульсиях.

Естественные и промышленные влагосодержащие твердые материалы относятся к коллоидным, капиллярнопористым или капиллярнопористым коллоидным телам; наиболее многочисленной является последняя категория материалов. Тело считается капиллярнопористым, а поры капиллярными, если капиллярный потенциал значительно больше потенциала поля тяжести; если оба вида потенциалов соизмеримы, тело является просто пористым. Сорбционная способность и водоудерживающие свойства капиллярнопористого материала зависят от его пористой структуры и геометрии пористой системы — площади поверхности капилляров и их размеров.

Границей между микро- и макрокапиллярами условно считают радиус капилляра, равный 0,1 *мкм*. Капиллярнопористые тела имеют поры разных размеров. Если дисперсия функции распределения пор по размерам равна нулю, структура тела монокапиллярна; это условие редко выполняется у реальных материалов, структура которых является поликапиллярной.

Для измерений влажности важное значение имеют виды и формы связи влаги с веществом, влияющие на свойства влагосодержащего материала.

Из известных классификаций видов и форм связи влаги чаще всего используется предложенная П. А. Ребиндером, основанная на величине энергии связи E. По этой классификации (с некоторыми дополнениями М. Ф. Казанского [Л. 1-2]) всю влату коллоидного капиллярнопористого тела можно разделить на следующие виды и формы (в порядке нарастания величины E):

I. Свободная вода.

II. Влага капиллярносвязанная (физико-механической связи): 1) влага капиллярного состояния в макропорах; 2) стыковая влага макропор; 3) капиллярная влага микропор.

III. Влага адсорбционносвязанная (физико-химической связи): 1) влага полимолекулярной адсорбции; 2) влага мономолекулярной адсорбции.

IV. Вода химически связанная (химической связи).

Наиболее прочно удерживается химически связанная вода (гидратная или кристаллогидратная). Ее молекулы входят в состав основного вещества и освобождаются лишь химическим взаимодействием или прокаливанием.

Адсорбционносвязанная вода образуется в результате действия молекулярного силового поля. На начальном этапе сорбции на внешних и внутренних поверхностях тела создается мономолекулярный слой, наиболее прочно связанный с поверхностью адсорбента; затем он сорбирует второй слой, третий и т. д.; последующие слои связаны менее прочно.

К физико-химической относится и осмотическая связь — слабая обратимая связь, имеющая место у растительных клеток с концентрированным раствором, в который через полупроницаемую перегородку проникает вода из окружающей среды с менее концентрированным раствором.

Капиллярносвязанная вода образуется в микрокапиллярах поглощением воды из влажного воздуха или непосредственным соприкосновением, в сквозных макрокапиллярах — непосредственным соприкосновением. Причиной возникновения данной формы связи является капиллярное давление, обусловленное кривизной поверхности жидкости в капиллярах. К этой же категории относится связь смачиванием при непосредственном соприкосновении с поверхностью тела вследствие действия поверхностного натяжения. Считается, что в отличие от адсорбционносвязанной вода физико-механической связи удерживается в неопределенных соотношениях и в основной массе сохраняет свои исходные свойства.

Известные методы измерения влажности по-разному реагируют на формы связи влаги. Метод высушивания (и ряд других аналитических методов) не учитывает химически связанной воды. Для диэлькометрического метода существенно то обстоятельство, что химически связанная вода имеет значительно меньшую диэлектрическую проницаемость (по данным некоторых исследователей $\varepsilon_{св}=4{,}5\div5{,}8$), чем свободная ($\varepsilon\approx81$), причем $\varepsilon_{св}$ не зависит от частоты электрического поля и температуры материала. Из других физических методов измерения влажности формы связи влаги в большей или меньшей степени различают методы ядерного магнитного резонанса и нейтронный (см. § 5-1 и 5-2).

Большинство нормативных документов, применяемых на практике (стандарты, технологические инструкции и т. п.), основано на учете только свободной влаги. Однако во многих случаях возникает необходимость получения информации о влаге различных видов связи. Это относится не только к экспериментальным исследованиям в ряде областей науки, но и к многочисленным физическим и технологическим процессам, как, например, твердение цемента и бетона, связывание влаги целлюлозой, искусственными волокнами, глиной и т. д. В биохимических объектах, состоящих из растительных и животных клеток, вода участвует в биохимических процессах, проис-

ходящих на всех этапах существования объекта, и ее реакционная способность зависит от прочности связи с тканью оболочки [Л. 1-3].

Задача количественного анализа влаги различных форм, связи достаточно сложна; дополнительные затруднения вызывает и то, что в ряде процессов одна форма связи постепенно переходит в другую.

Некоторую информацию о формах связи влаги дают изотермы сорбции, описывающие взаимодействие материала с окружающим воздухом в статике. Этот естественный сорбционный процесс определяется главным образом отношением парциальных давлений пара у поверхности материала ($p_м$) и в воздухе ($p_в$).

Если $p_м > p_в$, происходит процесс испарения влаги из материала (десорбция); при $p_м < p_п$ имеет место поглощение водяного пара материалом из воздуха (сорбция). Влагообмен и теплообмен между материалом и воздухом прекращаются при достижении гигротермического равновесия; соответствующее влагосодержание материала называется равновесным.

Равновесное влагосодержание любого материала зависит от температуры и влажности окружающего воздуха и от способа достижения равновесия (повышением или понижением влажности). Графическое изображение зависимости равновесного влагосодержания материала от относительной влажности воздуха φ при равенстве температур материала и воздуха называется изотермой сорбции или десорбции в зависимости от того, в результате какого процесса (сорбции или десорбции) было достигнуто равновесие. Изотермы сорбции и десорбции капиллярнопористых тел не совпадают (сорбционный гистерезис).

На рис. 1-1,*а* показаны типичные изотермы сорбции и десорбции коллоидного капиллярнопористого тела. Эти кривые имеют характерную S-образную форму; изотерма сорбции расположена ниже изотермы десорбции. Обе изотермы совпадают лишь в двух точках: при $\varphi = 0$ и 100%. Влагосодержание, соответствующее $\varphi = 100\%$, т. е. точке *С* пересечения изотерм с линией $\varphi = 100\%$, именуемой гигроскопической точкой, называется максимальным гигроскопическим влагосодержанием $u_{г.м}$. При данной температуре тело не способно поглотить больше влаги из воздуха, и дальнейшее увлажнение возможно только путем механического добавления внешней влаги. Часть графика, ограниченная изотермой сорбции и ординатой $\varphi = 100\%$, представляет собой область сорбции; зона, расположенная ниже изотермы десорбции, является областью десорбции. Диапазон изменения влагосодержания от $u = 0$ (абсолютно сухое вещество) до $u = u_{г.м}$ называют областью гигроскопического состояния материала, область $u > u_{г.м}$ — областью его влажного состояния.

Большое значение сорбционных процессов при измерениях влажности определяется, в частности, тем, что равновесное влагосодержание у многих тел, особенно у коллоидных, достигается чрезвычайно медленно, иногда в течение месяцев. Средняя влажность обычно не равна значениям влажности в отдельных точках тела, и в ряде случаев приходится принимать во внимание неравномерность распределения влажности по его объему. С другой стороны, в некоторых методах влажность твердых тел и газов оценивают по поглощению влаги гигроскопическими телами, используя явление гигротермического равновесия.

Изотермы сорбции и десорбции, как правило, определяются эмпирически для каждого материала в отдельности. Аналитическое определение уравнений этих характеристик весьма затруднительно,

в частности, потому, что материалы содержат влагу с различными формами связи. Различные исследователи предлагали различные уравнения, описывающие сорбционные изотермы определенных групп материалов; уравнения эти основаны на обработке экспериментальных данных.

У некоторых материалов равновесная влажность слабо зависит от температуры; однако у большинства материалов изотермы сорбции и десорбции с изменением температуры перемещаются. С повышением температуры та же равновесная влажность материала достигается при более высокой влажности воздуха (рис. 1-1,*б*). Реже (например, у угля) равновесное влагосодержание (при $\varphi=\text{const}$) увеличивается с ростом температуры. Зависимость равновесного влагосодержания одного и того же материала от его температуры нелинейна.

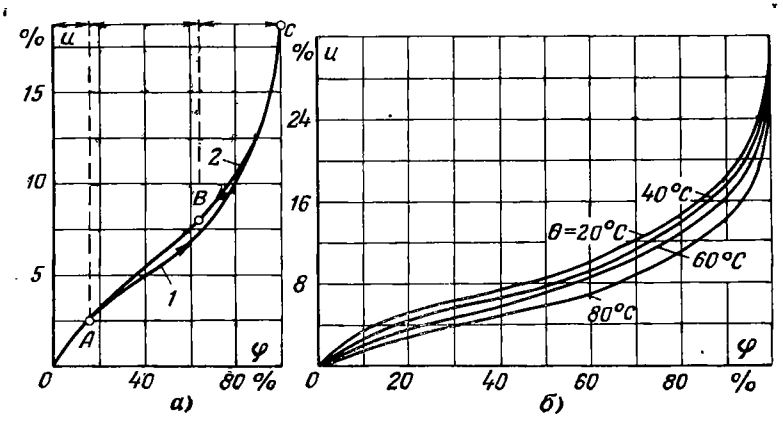


Рис. 1-1. Сорбционные изотермы (*а*) и их зависимость от температуры (*б*).

φ — относительная влажность воздуха; *u* — влагосодержание твердого материала; θ — температура; *1* — изотерма сорбции; *2* — изотерма десорбции; *C* — гигроскопическая точка.

Приведенная выше классификация форм связи базируется на интенсивности энергии связи. Для свободной воды (при $\varphi=100\%$) $E=0$; чем меньше влагосодержание материала, тем больше работа, необходимая для удаления влаги из него. Уменьшение свободной энергии связи ΔE, т. е. работа L изотермического отрыва одного моля воды без изменения состава вещества, составляет:

$$L=-\Delta E=-RT\ln\varphi, \qquad (1\text{-}1)$$

где $R=8{,}314$ *дж*/(*моль* · *град*) — газовая постоянная; T — температура, °К; φ — относительная влажность (в долях единицы) воздуха, соответствующая равновесному влагосодержанию вещества.

Форма изотермы сорбции, точнее, положение сингулярных точек изотермы, позволяет определить переход одной формы связи в другую. Так, например, на рис. 1-1,*а* участок *OA* соответствует влаге химически связанной и мономолекулярной адсорбции, *AB* — влаге

полимолекулярной адсорбции, BC — капиллярносвязанной влаге. Если необходима количественная оценка, можно при наличии сорбционной изотермы материала вычислить из выражения (1-1) энергию связи для любых равновесных влагосодержаний в гигроскопической области (см., например, [Л. 1-4]).

Существует и ряд экспериментальных методов анализа форм связи влаги, из которых наибольший интерес представляют адсорбционно-структурные, теплоты смачивания, термографические, в частности кинетический метод термограмм изотермической сушки [Л. 1—2] и его сочетание с энергограммами сушки [Л. 1-5]. Достоинством последних методов является возможность определения по результатам одного опыта водоудерживающей способности материала по отношению ко всем возможным формам и видам связи влаги, причем затрата времени составляет несколько часов. Общими недостатками аналитических методов являются громоздкая методика и значительная длительность анализа, необходимость отбора образцов, а иногда и их разрушение. Значительный интерес представляет привлечение для такого анализа электрических и других физических методов измерения влажности, свободных от перечисленных недостатков; работы, выполненные в этом направлении, рассматриваются в главах, посвященных соответствующим методам.

Механизм переноса влаги в капиллярнопористых телах весьма сложен. Влага перемещается в виде пара и жидкости, причем следует различать влагоперенос внутренний и внешний — с поверхности тела в окружающую среду. Теория процессов массо- теплопереноса разработана в СССР А. В. Лыковым и другими исследователями.

Приведем в элементарном виде некоторые положения этой теории, используемые в измерениях влажности. Явления тепло- и массопереноса рассматриваются во взаимосвязи, и к массопереносу по аналогии применим ряд термодинамических понятий. Важнейшим из них является потенциал переноса влаги (потенциал массопереноса) θ (аналог температуры при переносе тепла), под воздействием которого происходит перемещение влаги.

В гигроскопической области потенциал массопереноса равен химическому потенциалу μ данного вещества и энергии связи одного моля воды с веществом: $\theta=\mu=E$. При постоянной температуре T он является функцией влагосодержания u материала: $\theta=(1/c_m)u$, где c_m — удельная изотермическая влагоемкость (аналог удельной теплоемкости) материала. При постоянстве c_m потенциал θ связан с влагосодержанием линейной зависимостью. Единицей потенциала θ, определяемой экспериментальным путем по Лыкову, принимают сотую долю максимального гигроскопического влагосодержания $u_{г.э}$ эталонного тела, в качестве которого была выбрана целлюлоза в виде фильтровальной бумаги: $\theta=100u_э/u_{г.э}$, где $u_э$ — удельное влагосодержание эталона, приведенного в непосредственное соприкосновение с исследуемым материалом, причем оба тела находятся в состоянии термодинамического равновесия.

Величиной, родственной θ и применяемой в агрофизике, является величина $pF=\lg F$ (F — сосущая сила). В гигроскопической области F можно определить по формуле:

$$F=\frac{RT}{Mg}\ln\varphi, \qquad (1\text{-}2)$$

где M — молекулярная масса воды; g — гравитационная постоянная. Остальные обозначения — см. формулу (1-1). В области влажного

состояния тела величина pF пропорциональна капиллярному давлению и определяется с помощью тензиметров.

Внутренний изотермический перенос влаги в виде жидкости можно описать общим законом массопереноса:

$$q = -k \operatorname{grad} \theta_m, \tag{1-3}$$

где q — плотность потока влаги, равная количеству влаги dG, переносимому в единицу времени τ через единицу площади S эквипотенциальной поверхности:

$$q = \frac{dG}{d\tau} \frac{1}{S}, \quad кг/(м^2 \cdot ч),$$

k — коэффициент массопроводности (влагопроводности), $кг \times \times моль/(ч \cdot м \cdot дж)$; $\operatorname{grad} \theta_m$ — градиент потенциала массопереноса, $дж/(моль \cdot м)$.

В неизотермических условиях влага перемещается под действием не только градиента влажности, но и градиента температуры (термовлагопроводность).

Дифференциальное уравнение влагопереноса, описывающее изменение влагосодержания во времени для трехмерного потока влаги в изотропном теле, имеет следующий вид (аналогичный уравнению теплопереноса):

$$\frac{\partial u}{\partial \tau} = a_m \nabla^2 u + a_m \delta \nabla^2 t, \tag{1-4}$$

где u — влагосодержание, $кг$ влаги на 1 $кг$ сухого вещества; a_m — коэффициент диффузии влаги, $м^2/сек$; δ — термоградиентный коэффициент, $кг/(кг \cdot град)$; t — температура материала, $град$; $\nabla^2 = \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}\right)$ — оператор Лапласа для декартовых координат x, y, z,

Пользование уравнениями (1-3) и (1-4) затрудняется тем, что их коэффициенты k, a_m, δ не постоянны, а являются функциями влажности и температуры материала и некоторых других переменных; их значения определяют различными экспериментальными методами.

Для измерений влажности большое значение имеют процессы контактного влагообмена, т. е. массопереноса при непосредственном соприкосновении двух тел. Если массообмен происходит только через поверхность контакта двух тел, имеющих разные значения потенциалов массопереноса θ_1 и θ_2, его можно описать уравнением, аналогичным (1-3):

$$\frac{dG}{d\tau} = k_{1\text{-}2} S_{эф} (\theta_1 - \theta_2), \tag{1-5}$$

где $k_{1\text{-}2}$ — коэффициент контактной массопроводности; $S_{эф}$ — площадь эффективной (участвующей в контактном массообмене) поверхности тел.

Согласно уравнению (1-5) влагообмен продолжается до достижения равенства потенциалов массопереноса $\theta_1 = \theta_2$.

В случае, когда влагообмен происходит через воздушную прослойку, он описывается уравнениями (для $\theta_1 > \theta_2$):

$$\left.\begin{aligned} \frac{dG_{1\text{-в}}}{d\tau} &= K_{1\text{-в}} S_{1\text{-в}} (\theta_1 - \theta_в); \\ \frac{dG_{2\text{-в}}}{d\tau} &= K_{2\text{-в}} S_{2\text{-в}} (\theta_в - \theta_2), \end{aligned}\right\} \qquad (1\text{-}6)$$

где $G_{1\text{-в}}$ и $G_{2\text{-в}}$ — количества влаги, переносимые в единицу времени через единицу поверхности из материала *1* в воздух и из воздуха в материал *2*; $S_{1\text{-в}}$, $S_{2\text{-в}}$ — площади поверхностей материалов *1* и *2*, участвующие в влагообмене с воздухом; $K_{1\text{-в}}$, $K_{2\text{-в}}$ — коэффициенты массопередачи между материалами *1*, *2* и воздухом; $\theta_в$ — потенциал массопереноса воздуха.

1-2. ВЕЛИЧИНЫ, ХАРАКТЕРИЗУЮЩИЕ СОДЕРЖАНИЕ ВЛАГИ В ТВЕРДЫХ МАТЕРИАЛАХ И ЖИДКОСТЯХ

Ввиду отсутствия установленных стандартом единиц измерения влагосодержания в настоящем параграфе рассматриваются величины, принятые для этой цели в научно-технической литературе и на практике.

Наиболее распространенными являются две величины: влагосодержание и влажность. Обе являются относительными и выражаются в безразмерных единицах. Ранее применялись наименования: абсолютная влажность (вместо влагосодержания) и относительная влажность (вместо влажности).

Под влагосодержанием (массовым) u понимается отношение массы влаги M, содержащейся в теле, к массе абсолютно сухого тела M_0:

$$u = \frac{M}{M_0}. \qquad (1\text{-}7)$$

Под влажностью (массовой) W понимается отношение массы влаги M, содержащейся в теле, к массе влажного материала M_1:

$$W = \frac{M}{M_1} = \frac{M}{M_0 + M}. \qquad (1\text{-}8)$$

Эти величины иногда выражают через веса и в процентах. В таком случае выражения (1-7) и (1-8) прини-

мают вид:

$$\left.\begin{aligned} u &= \frac{P - P_0}{P_0} 100, \%; \\ W &= \frac{P - P_0}{P} 100, \%, \end{aligned}\right\} \quad (1\text{-}9)$$

где P — вес влажного тела; P_0 — вес абсолютно сухого тела.

Для указания содержания влаги в материале может быть применена любая из этих величин. Переход от одной величины к другой может быть осуществлен по соотношениям:

$$\left.\begin{aligned} W &= \frac{u}{1+u}; \\ u &= \frac{W}{1-W}. \end{aligned}\right\} \quad (1\text{-}10)$$

Так, например, $u=1$ соответствует $W=0{,}5$.

В определенных отраслях науки и техники для указания содержания влаги в материале применяется влагосодержание u или влажность W в зависимости от установившихся традиций. Большей частью в теоретических исследованиях и расчетах содержание влаги задается влагосодержанием u; в производственных условиях и в экспериментах для той же цели чаще применяют влажность W.

В некоторых случаях, например при измерении влажности почв, пользуются величинами, характеризующими содержание воды в единице объема материала. По аналогии с приведенными выше величинами можно различать:

а) объемную влажность

$$W_{об} = \frac{M}{V} = \frac{V_в}{V} \rho_в = W\rho; \quad (1\text{-}11)$$

б) объемное влагосодержание

$$u_{об} = \frac{M}{V_0} = \frac{V_в}{V_0} \rho_в = u\rho_0, \quad (1\text{-}12)$$

где V, V_0, $V_в$, ρ, ρ_0, $\rho_в$ — объем и плотность влажного, абсолютно сухого материала и воды. Объемные влажность и влагосодержание имеют размерность плотности.

Для перехода от объемных величин к массовым необходимо знать плотность материала. Определение плотности (особенно ρ_0) во многих случаях связано с трудностями, в связи с чем объемные единицы не получили широкого распространения. Если принять, что объемы абсолютно сухого и влажного материала равны ($V = V_0$), можно легко установить связь между ρ, ρ_0 и величиной, характеризующей влажность. Так как

$$W = \frac{V\rho - V\rho_0}{V\rho},$$

то

$$\rho = \frac{\rho_0}{1 - W} = \rho_0 (u + 1). \qquad (1\text{-}13)$$

При измерениях микроконцентраций влаги в жидкостях по аналогии с измерениями влажности газов (см. § 6-1) в качестве единицы измерения влагосодержания или объемного влагосодержания принимают миллионную долю (русское обозначение — м. д., международное — *ppm*).

В отдельных отраслях техники некоторые величины, производные от рассмотренных, нашли весьма узкое применение; приведем некоторые примеры. Для характеристики содержания влаги в листовых материалах применяют отношение массы влаги M к площади S поверхности материала, т. е. содержание влаги в единице площади (неправильно именуемое иногда «поверхностной влажностью»):

$$W_п = \frac{M}{S}, \quad кг/м^2.$$

В ряде случаев (в частности, в текстильной и бумажной промышленности) прибегают к величине «содержание сухого вещества» (немецкое обозначение — *Atro*, т. е. «абсолютная сухость»):

$$A = \frac{1}{1 + u} = 1 - W.$$

1-3. ОБЗОР И КЛАССИФИКАЦИЯ МЕТОДОВ ИЗМЕРЕНИЯ ВЛАЖНОСТИ

Известны многочисленные методы определения влажности твердых тел и жидкостей; им посвящена обширная литература (см., например, обзоры [Л. 1-6 и 1-7]). Ниже приводится краткая характеристика важнейших методов, нашедших практическое применение.

Методы измерения влажности принято делить на прямые и косвенные. В прямых методах производится непосредственное разделение материала на сухое вещество и влагу. В косвенных методах измеряется величина, функционально связанная с влажностью материала. Косвенные методы требуют предварительной калибровки с целью установления зависимости между влажностью материала и измеряемой физической величиной.

Прямые методы

Наиболее распространенным прямым методом является метод высушивания (термогравиметрический), заключающийся в воздушно-тепловой сушке образца материала до достижения равновесия с окружающей средой; это равновесие условно считается равнозначным полному удалению влаги. На практике применяется высушивание до постоянного веса; чаще применяют так называемые ускоренные методы сушки. В первом случае сушку заканчивают, если два последовательных взвешивания исследуемого образца дают одинаковые или весьма близкие результаты. Так как скорость сушки постепенно уменьшается, предполагается, что при этом удаляется почти вся влага, содержащаяся в образце. Длительность определения этим методом составляет обычно от нескольких часов до суток и более. В ускоренных методах сушка ведется в течение определенного, значительно более короткого промежутка времени при повышенной температуре (например, стандартный метод определения влажности зерна сушкой размолотой навески при $+130\,^{\circ}C$ в течение 40 *мин*). Для ускоренной сушки ряда материалов применяют инфракрасные лучи, а в отдельных случаях — диэлектрический нагрев (токи высокой частоты).

Определению влажности твердых материалов высушиванием присущи следующие методические погрешности:

а) при высушивании органических материалов наряду с потерей гигроскопической влаги происходит потеря летучих; одновременно при сушке в воздухе имеет место поглощение кислорода вследствие окисления вещества, а иногда и термическое разложение пробы;

б) прекращение сушки соответствует не полному удалению влаги, а равновесию между давлением водяных паров в материале и давлением водяных паров в воздухе;

в) удаление связанной влаги в коллоидных материалах невозможно без разрушения коллоидной частицы и не достигается при высушивании;

г) в некоторых веществах в ходе сушки образуется водонепроницаемая корка, препятствующая дальнейшему удалению влаги.

Некоторые из указанных погрешностей можно уменьшить сушкой в вакууме при пониженной температуре или в потоке инертного газа. Однако для вакуумной сушки требуется более громоздкая и сложная аппаратура, чем для воздушно-тепловой.

При наиболее распространенном методе сушки (в сушильных шкафах) имеются погрешности, зависящие от применяемой аппаратуры и техники высушивания. Так, например, результаты определения влажности зависят от длительности сушки, от температуры и атмосферного давления, при которых протекала сушка. Температура имеет особенно большое значение при использовании ускоренных методов, когда понижение температуры сильно влияет на количество удаленной влаги. На результаты высушивания влияют также форма и размеры бюкс и сушильного шкафа, распределение температуры в сушильном шкафу, скорость движения воздуха в нем, возможность уноса пыли или мелких частиц образца и т. д. Для материалов, подвергающихся перед определением влажности измельчению, большое значение имеет убыль влаги в образце в процессе измельчения. Эта убыль особенно велика, если при размоле имеет место нагрев образца. С другой стороны, возможно поглощение влаги из окружающей среды в промежутках времени между окончанием сушки и взвешиванием образца. Изменения влажности образца до или после сушки вследствие сорбции или десорбции имеют место и у других материалов с высокой гигроскопичностью, например тонких листовых (бумаги).

В итоге высушивание представляет собой чисто эмпирический метод, которым определяется не истинная величина влажности, а некая условная величина, более или менее близкая к ней. Определения влажности, выполненные в неодинаковых условиях, дают плохо сопоставимые результаты. Значительно более точные результаты дает вакуумная сушка, выполняемая обычно в камере при давлении 25 *мм рт. ст.* и ниже до постоянного веса.

В дистилляционных методах исследуемый образец подогревается в сосуде с определенным количеством жидкости, не смешивающейся с водой (бензин, бензол, толуол, ксилол, минеральное масло и т. д.). Выделяющиеся пары воды вместе с парами жидкости подвергаются отгонке и, проходя через холодильник, конденсируются в измерительном сосуде, в котором измеряется объем или масса воды. Дистилляционные методы в различных модификациях и с использованием разных конструкций аппаратуры были разработаны для различных материалов, в том числе и для жидких (например, стандартный метод Дина и Старка для нефти и нефтепродуктов). Однако дистилляционным методам также свойственны многие недостатки и источники погрешностей, в том числе и систематических, как показали исследования метода Дина и Старка на нефтях [Л. 1-8].

Экстракционные методы основаны на извлечении влаги из исследуемого образца твердого материала водопоглощающей жидкостью (диоксан, спирт) и определении характеристик жидкого экстракта, зависящих от его влагосодержания — плотности, показателя преломления, температуры кипения или замерзания и т. п.

Основой химических методов является обработка образца твердого материала реагентом, вступающим в химическую реакцию только с влагой, содержащейся в образце. Количество воды

в образце определяется по количеству жидкого или газообразного продукта реакции. Наиболее распространенными химическими методами являются карбидный (газометрический) метод и применение реактива Фишера (метод К. Фишера).

В первом методе измельченный образец влажного материала тщательно смешивают с карбидом кальция в избыточном количестве, причем имеет место реакция

$$CaC_2 + 2H_2O \longrightarrow Ca(OH)_2 + C_2H_2.$$

Количество выделенного газа определяют измерением его объема (волюмометрический способ), давления в закрытом сосуде (манометрический способ) или путем взвешивания (гравиметрический способ).

Иногда применяют и другие методы, основанные на гидролизе, например на реакции гидрида кальция с определением количества выделившегося водорода:

$$CaH_2 + 2H_2O \longrightarrow Ca(OH)_2 + 2H_2.$$

Газометрические приборы обычно градуируют эмпирически, так как практически не вся вода участвует в реакции.

Реактив Фишера, представляющий собой раствор возогнанного металлического йода, безводного пиридина и сухого сернистого ангидрида в абсолютном метаноле, нашел применение для определения влажности многочисленных материалов (твердых, жидких и газообразных) в лабораторных условиях. В основу метода положена известная в аналитической химии реакция:

$$J_2 + SO_2 + 2H_2O \longrightarrow H_2SO_4 + 2HJ.$$

Метод отличается универсальностью, высокой чувствительностью и точностью, применим в широком диапазоне влагосодержаний (включая малые и микровлагосодержания); по данному методу имеется обширная литература [Л. 1-9 и 1-10]. Обычно конец титрования определяют визуально или электрометрическим способом; в последнее время применяются и автоматические титраторы.

Менее распространен химический метод определения влажности по повышению температуры вследствие химической реакции реагента с влагой вещества; чаще всего в качестве реагента используется серная кислота. Повышение температуры смеси карбида кальция с материалом можно использовать также в карбидном методе, так как реакция воды с CaC_2 протекает с выделением тепла.

Косвенные методы

В этих методах оценка влажности материала производится по изменению различных его свойств.

В пикнометрическом методе используются водные пикнометры для определения плотности твердых материалов.

Недостатком этого метода является необходимость в дополнительной информации о плотности материала;

кроме того, на результат измерения влияет содержание в материале воздуха и водорастворимых компонентов (соли и т. п.).

Механические методы основаны на измерении изменяющихся с влажностью механических характеристик твердых материалов: сопротивления раздавливанию (зерна); сопротивления вдавливанию металлической иглы, конуса или ножа; сопротивления деформирующему усилию; давления, необходимого для уплотнения образца (хлопка) постоянной массы в фиксированном объеме; усадки материала (почвы) под давлением поршня в цилиндре и др. Этим методам, отличающимся своей простотой, свойственна низкая точность.

Из косвенных методов важнейшими и получившими наибольшее распространение являются те физические методы, которые рассматриваются в настоящей книге.

Все физические методы основаны на преобразовании влажности в другую физическую или физико-химическую величину, более удобную для измерения и дальнейших преобразований. Характер измеряемого свойства может служить основным признаком для классификации физических методов измерения влажности.

Целесообразно выделить в отдельную группу электрические методы, в основу которых положено прямое измерение электрических параметров материала.

Вторую группу образуют методы, у которых измеряемая физическая величина не является электрической. Этим методам присвоено наименование «неэлектрических». Следует помнить, что во втором и третьем звеньях структурной схемы (рис. В-2) измеряемая величина, как правило, преобразуется в электрические сигналы.

Комбинирование методов обеих групп осуществляется в «многопараметрических» методах, основанных на совокупном измерении двух или большего числа параметров материала; каждый из них может быть электрическим или неэлектрическим.

М. В. Венедиктов [Л. 1-11] предложил разделить все методы определения влагосодержания на две группы:

1. Методы, основанные на измерении одного или нескольких свойств влажного материала без предварительного разделения воды и исследуемого материала.

2. Методы «массопереносные», основанные на предварительном переносе влаги во вспомогательную среду.

Эти последние методы реализуются системами[1]: «твердое тело — твердое тело», «твердое тело — жидкость», «твердое тело — газ» или «жидкость — твердое тело», «жидкость — газ». К массопереносным относятся рассмотренные выше прямые методы, а также некоторые косвенные.

Мы будем рассматривать те «массопереносные» методы, в которых влага переносится во вспомогательную среду того же или другого агрегатного состояния, что и анализируемая среда, причем влагосодержание вспомогательной среды определяется тем или иным физическим методом. Массопереносные методы применимы при различных агрегатных состояниях исследуемого вещества и рассматриваются в гл. 10.

Рассмотрим теперь подробнее электрические и неэлектрические методы.

Измерение электрической проводимости материала на постоянном токе и переменном токе промышленной или звуковой частоты осуществляется в кондуктометрических влагомерах.

Для диэлькометрических методов характерно измерение диэлектрических свойств (комплексной диэлектрической проницаемости и ее составляющих) материала в широком диапазоне частот — от звуковых до сверхвысоких; измерения на СВЧ имеют ряд особенностей, ввиду чего они выделены в самостоятельную подгруппу. Наконец, методы измерения, основанные на использовании иных электрических свойств влагосодержащих материалов (э. д. с. гальванической пары, электростатического заряда и т. д.), ввиду их малой распространенности целесообразно объединить в одну группу «прочих электрических методов».

К важнейшим неэлектрическим относятся методы, основанные на использовании: а) теплофизических характеристик материала; б) акустических свойств материала; в) гамма-лучей и нейтронов (радиометрические методы); родственным является метод, основанный на использовании рентгеновского излучения; г) ядерного магнитного резонанса; д) видимого света и инфракрасного излучения.

Последние подгруппы иногда именуют «спектральными методами».

---

[1] На первом месте указан объект измерения, на втором — среда, в которую переносится влага.

На рис. 1-2 приведена предлагаемая схема классификации физических методов измерения влажности твердых и жидких материалов.

Физические методы измерения влажности материалов по сравнению с другими методами имеют большие преимущества. Они являются наиболее быстродействующими из всех существующих методов определения влажности. Определение влажности методом высушивания длится от многих часов (высушивание до постоянного веса) до 1 *ч* (ускоренные методы высушивания) или в лучшем

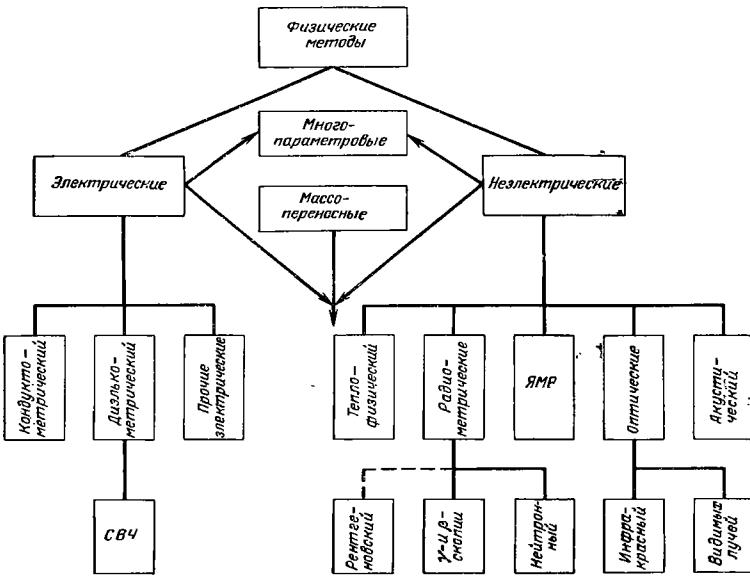


Рис. 1-2. Схема классификации физических методов измерения влажности твердых материалов и жидкостей.

случае до десятков или нескольких минут (сушка инфракрасными лучами или токами высокой частоты). В то же время длительность определения влажности электрическим неавтоматическим влагомером равна от одной до нескольких минут, а при применении некоторых типов автоматических влагомеров непрерывного действия измерение можно считать практически безынерционным.

Физические методы позволяют автоматизировать измерения влажности и находят применение в системах

информационно-измерительных и управления для многих технологических процессов. Большинство влагомеров позволяет проводить измерения без разрушения образца, чем достигается экономия материала, а также возможность повторения измерения на одном и том же образце при проверке результата измерения. Это приводит к дополнительному сокращению длительности измерений.

Глава вторая

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ИЗМЕРЕНИЯ ВЛАЖНОСТИ

2-1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ. ОСНОВЫ КОНДУКТОМЕТРИЧЕСКОГО МЕТОДА

Основой электрических (кондуктометрического и диэлькометрического) методов измерения влажности является зависимость от влажности параметров, характеризующих поведение влажных материалов в электрических полях. Главной задачей теории этих методов является создание достаточно точных математических моделей влажного материала, описывающих зависимости электрических свойств материала от его влагосодержания и других параметров, т. е. зависимости вида $e=f(W, \bar{z})$ первичного преобразователя влагомера (рис. В-2). Такие модели нужны для анализа и синтеза влагомеров и, самое главное, для перехода от эмпирических методов градуировки и расчета этих приборов к строгим и точным математическим.

Современная теория диэлектриков не дает полного решения этой задачи для капиллярнопористых влагосодержащих тел, представляющих собой многофазные гетерогенные системы с резко отличными физическими (в том числе и электрическими) свойствами фаз. Во влагосодержащих дисперсных системах имеются также поверхностные фазы, физико-химические свойства которых отличаются от свойств воды в объеме. Неоднородности состава и структуры, в частности пористой, этих тел обусловливают неоднородности внутреннего электрического поля, оказывающие влияние на электрические параметры тела.

Такие системы нельзя рассматривать как механические смеси сухого вещества и влаги. Для создания упомянутых математических моделей необходимо макроскопическое (электротехническое) и микроскопическое (молекулярное) приближения физики диэлектриков дополнить физико-химическим подходом, учитывающим состояние влаги и ее формы связи с сухим веществом. Второе существенное требование — исследование параметров материалов в широком диапазоне частот.

Для удовлетворения указанных требований приходится использовать преимущественно не аналитические, а экспериментальные зависимости.

Наиболее простой характер имеет зависимость от влажности проводимости материала при постоянном токе, а также при промышленной и низких звуковых частотах, т. е. при существенном преобладании чисто омической проводимости, вызванной перемещением носителей заряда.

Влагосодержащие материалы, являясь в сухом виде диэлектриками с удельным объемным сопротивлением $\rho_V = 10^{10}—10^{15}$ *ом·см* и выше, в результате увлажнения становятся полупроводниками; величина ρ_V понижается до $10^{-2}—10^{-3}$ *ом·см*. Удельное сопротивление изменяется, следовательно, в зависимости от влажности в чрезвычайно широком диапазоне, охватывающем 12—18 порядков. Неоднородность диэлектрика, наличие в нем влаги сказываются не только на величине удельной проводимости, но и на качественных особенностях электропроводности: на ее зависимости от напряженности электрического поля и температуры. Проводимость таких материалов не является чисто ионной. С другой стороны, эти материалы не являются химически чистыми полупроводниками, у которых носителями тока являются только электроны атомов полупроводникового вещества. Основное количество носителей тока дает влага. Чистая вода имеет заметную электропроводность ($\rho_V \approx 22 \cdot 10^6$ *ом·см* при $+20\,^{\circ}C$); важнее, однако, сильное диссоциирующее действие, оказываемое водой на многие электролиты. Электропроводность твердого материала определяется электролитами, растворенными в воде; эти электролиты содержатся главным образом в самом материале. При этом характер зависимости удельной электропроводности материала от содержания влаги определяется распределением влаги в нем, зависящим в свою очередь от

пористой структуры материала, формы пор, их размеров и характера распределения.

При измерениях влажности гигроскопических материалов возникают затруднения при оперировании удельными электрическими характеристиками. У этих материалов удельное электрическое сопротивление не является строго неизменной характеристикой. В определенных условиях сопротивление датчика зависит от напряжения на измерительных электродах, что приводит к нелинейности вольт-амперной характеристики. Еще большее влияние имеют конфигурация электродов и их механические воздействия на материал.

Поверхностная электропроводность диэлектриков не является четко определенным понятием. Величина тока, протекающего между электродами, расположенными на

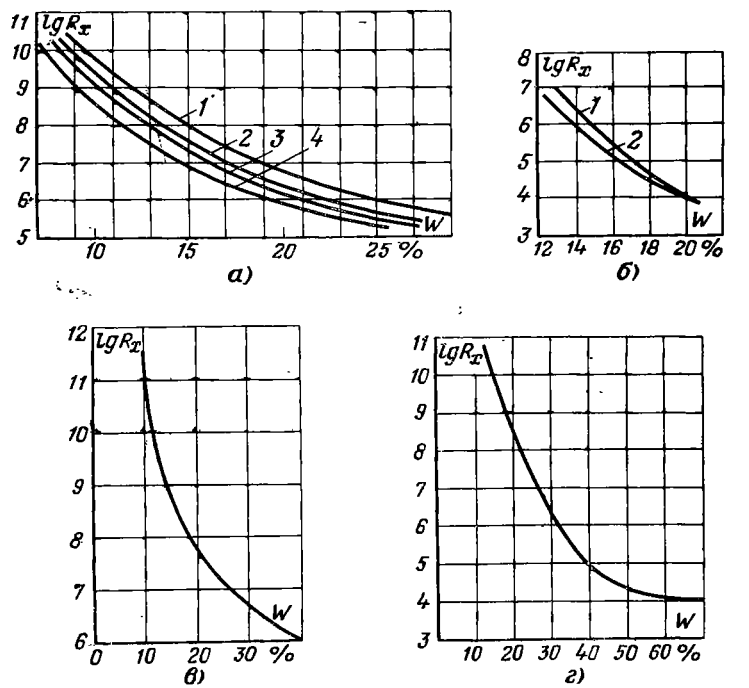


Рис. 2-1. Зависимость сопротивления датчика от влажности материала.

а — древесина: *1* — ель; *2* — сосна; *3* — береза; *4* — дуб и бук; *б* — зерно и мука; *1* — пшеница мягкая и мука; *2* — пшеница твердая; *в* — джут; *г* — хромовые кожи.

одной стороне поверхности диэлектрика, зависит от того, одинаковы ли проводимости поверхностного и внутренних слоев материала или имеется поверхностный слой с заметно повышенной по сравнению с внутренними слоями проводимостью.

При оценке влажности материала по его проводимости ток, проходящий через внутреннюю область материала, лучше характеризует установившуюся среднюю влажность материала по сравнению с током поверхностной утечки или током в поверхностном слое. Однако практически на результат измерения сопротивления датчика с материалом оказывает влияние не только объемный, но и поверхностный ток между электродами.

Из изложенного вытекает, что расчетные и экспериментальные значения удельных сопротивлений однозначно сопоставимы только при одинаковых условиях измерений.

Можно, однако, установить некоторые общие для рассматриваемого метода закономерности и в первую очередь закон зависимости сопротивления от влажности материала. На рис. 2-1 приведены в полулогарифмических координатах зависимости сопротивления датчика R_x от влажности материала, полученные для различных материалов в различных условиях измерения. Для всех рассмотренных материалов органического происхождения (как и почти для всех капиллярнопористых материалов) зависимость сопротивления R_x от влагосодержания u в общем виде может быть выражена степенной функцией

$$R_x = \frac{c}{u^k}, \qquad (2\text{-}1)$$

где c и k — положительные постоянные, зависящие от исследуемого материала и условий измерения.

График функции (2-1) представляет собой кривую, асимптотически приближающуюся к оси u. Функция $R_x(W)$, используемая в кондуктометрических влагомерах, имеет два характерных участка:

а) начальный участок, соответствующий низкой и средней влажности, характеризуется очень высокой крутизной и в полулогарифмических координатах может быть аппроксимирован прямой

$$\lg R_x = a - bW, \qquad (2\text{-}2)$$

где a и b — постоянные, зависящие от материала и условий измерения.

На этом участке влагомер имеет очень высокую чувствительность к изменениям влажности, являющейся основной величиной, которая определяет величину R_x; влияние других факторов на величину R_x незначительно по сравнению с влиянием влажности. Как следствие результат измерения влажности мало зависит, например, от изменений геометрических размеров электродов;

б) участок повышенной влажности характеризуется значительным снижением крутизны характеристики $R_x(W)$ и соответственно чувствительности влагомера с ростом влажности. На величину измеряемого сопротивления начинают оказывать превалирующее влияние факторы, не связанные с влажностью (химический состав материала и т. д.). Начиная с определенных значений влажности применение рассматриваемого метода становится практически невозможным вследствие недостаточной чувствительности и больших погрешностей влагомера. Кривая $R_x(W)$ не имеет точек перегиба, и переход от первого участка ко второму происходит плавно. Можно считать, что для большинства твердых материалов граница между ними близка к максимальной гигроскопической влажности.

Очевидно, что основная область применения кондуктометрического метода измерения влажности материала ограничена первым участком характеристики $R_x(W)$.

При этом нижний предел измерений ограничен трудностями, связанными с измерением очень больших сопротивлений ($R_x \geqslant 10^{11} \div 10^{12}$ *ом*), и для большинства твердых материалов соответствует влажности 5—8%.

У неводных жидкостей зависимость электрической проводимости от влагосодержания в узком диапазоне во многих случаях близка к линейной. Такая связь была установлена, например, для ракетных топлив [Л. 2-1] — гидразинной топливной смеси при измерениях влажности в пределах 0,5—3,3%.

Ионный характер проводимости влажных материалов является причиной электрохимических процессов, возникающих в системе электроды — материал при протекании через нее постоянного тока; эти процессы изменяют проводимость системы. Для устранения эффекта поляризации сопротивление датчика измеряют на переменном токе. При этом датчик представляет собой комплекс-

ное сопротивление с эквивалентными активной и реактивной (емкостной) составляющими.

При переменном токе промышленной частоты влияние поляризации электродов сохраняется, хотя и в значительно меньшей степени, чем при постоянном токе. Поляризация зависит от природы материала и условий измерения. Повышение частоты тока существенно ослабляет поляризацию электродов, однако с повышением частоты все большее значение приобретают диэлектрические характеристики материала, и кондуктометрический метод переходит в диэлькометрический.

2-2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ДИЭЛЬКОМЕТРИЧЕСКОГО МЕТОДА

В диэлькометрическом методе чаще всего используются средневолновый и коротковолновый ($f=0{,}3\div 30$ *Мгц*) диапазоны частот или сверхвысокие частоты (СВЧ). В первом случае геометрические размеры датчиков и других элементов измерительных цепей значительно меньше длины волны и их можно рассматривать как системы с сосредоточенными параметрами. При измерениях в области дециметровых, сантиметровых и миллиметровых волн приходится рассматривать системы с распределенными параметрами. Практически существует также промежуточная область частот. Предельной частотой для систем с сосредоточенными параметрами можно считать 100 *Мгц*.

Поведение диэлектрика в синусоидальном электромагнитном поле характеризуется макроскопически величинами комплексных диэлектрической ε^* и магнитной μ^* проницаемостей. У влажных материалов, не содержащих ферромагнетиков, величина $\mu^*\approx\mu_0$ (магнитной проницаемости пустоты) и их электрические свойства в слабых переменных электрических полях можно описать двумя параметрами, связанными с ε^*. При измерениях влажности используются следующие пары величин:

а) вещественная ε' и мнимая ε'' составляющие комплексной диэлектрической проницаемости $\varepsilon^*=\varepsilon'-j\varepsilon''$;

б) диэлектрическая проницаемость ε и тангенс угла диэлектрических потерь $\operatorname{tg}\delta$;

в) диэлектрическая проницаемость ε и удельная проводимость (точнее, ее активная составляющая) σ.

Зависимости между этими величинами имеют вид:

$$\varepsilon' = \varepsilon;\ \varepsilon'' = \sigma/\omega;\ \operatorname{tg}\delta = \varepsilon''/\varepsilon' = \sigma/\omega\varepsilon';$$
$$\varepsilon^* = \varepsilon(1 - j\operatorname{tg}\delta), \qquad (2\text{-}3)$$

где ω — угловая частота.

Зная одну из указанных пар параметров, можно, следовательно, вычислить любую другую пару. Реже пользуются такими параметрами, как добротность $Q = 1/\operatorname{tg}\delta$ или активная σ' и реактивная σ'' составляющие комплексной проводимости σ^*. При измерениях на сверхвысоких частотах иногда вводят из физической оптики комплексный показатель преломления $n^* = n - jk$ (n — показатель преломления, k — коэффициент поглощения), связанный с комплексной диэлектрической проницаемостью соотношением Максвелла: $\varepsilon^* = (n^*)^2$.

Современная физика диэлектриков связывает зависимость ε и $\operatorname{tg}\delta$ материалов от их свойств с основным процессом, происходящим в любом реальном диэлектрике под воздействием электрического поля, — поляризацией частиц диэлектрика.

В гетерогенных системах поляризация имеет неодинаковый характер для различных фаз и для всей системы в целом. На характеристики системы оказывает также влияние двойной электрический слой, определяемый наличием заряда на поверхности раздела между фазами, имеющими различные электрические свойства (ε и σ).

Рассмотрим в элементарной форме процессы поляризации и электрические свойства основных компонентов влажных материалов.

Вода и лед принадлежат к полярным веществам с отчетливо выраженными явлениями диэлектрической релаксации. У таких веществ при возрастании частоты поля диэлектрическая проницаемость изменяется от значения ε_0 при нулевой частоте (статическая диэлектрическая проницаемость) до значения ε_∞ при бесконечно большой частоте (оптическая диэлектрическая проницаемость), проходя через область аномальной диэлектрической дисперсии. В области дисперсии зависимость $\operatorname{tg}\delta(\omega)$ имеет экстремум (максимум) при частоте, равной критической частоте ω_c; абсциссе, равной ω_c, соответствует точка перегиба зависимости $\varepsilon(\omega)$. Время релаксации $\tau = 1/\omega_c$ равно времени, в течение которого после мгновенного снятия внешнего поля поляризация

уменьшается до величины $1/e$ от первоначального значения.

По Дебаю частотная зависимость диэлектрической проницаемости при релаксационном поглощении описывается уравнениями:

$$\varepsilon^* - \varepsilon_\infty = \frac{\varepsilon_0 - \varepsilon_\infty}{1 + j\omega\tau}, \tag{2-4}$$

откуда

$$\varepsilon' = \varepsilon_\infty + \frac{\varepsilon_0 - \varepsilon_\infty}{1 + \omega^2\tau^2} \tag{2-5}$$

и

$$\varepsilon'' = (\varepsilon_0 - \varepsilon_\infty)\frac{\omega\tau}{1 + \omega^2\tau^2}. \tag{2-6}$$

Из (2-6) можно вычислить максимальное значение ε'':

$$\varepsilon''_{\text{макс}} = \frac{\varepsilon_0 - \varepsilon_\infty}{2}.$$

Для воды при комнатных температурах критическая частота находится в диапазоне сантиметровых волн. Вычисленная по формуле Дебая критическая длина волны, соответствующая времени релаксации, $\lambda_c = 1$ *см*; по экспериментальным данным [Л. 2-2] при температуре 20 °С $\lambda_c = 1{,}74$ *см*. Значения ε и $\operatorname{tg}\delta$ чистой воды при температуре 25 °С, измеренные в широком диапазоне частот, приведены в табл. 2-1 [Л. 2-3].

Таблица 2-1

Параметр воды при 25°С	Частота, *гц*							
	10^5	10^6	10^7	10^8	$3\cdot10^8$	$3\cdot10^9$	10^{10}	$2{,}5\cdot10^{10}$
ε	78,2	78,2	78,2	78,0	77,5	76,7	55	34
$10^4\operatorname{tg}\delta$	4 000	400	46	50	160	1 570	5 400	2650

В диапазоне частот $10^5 < f < 10^7$—10^8 *гц* значение ε чистой воды при комнатной температуре обычно считают близким к 80.

Значение ε_∞ считают равным 5,5, хотя по данным некоторых исследователей более точными являются значения ε_∞, равные 4,5 или 4,9. Приведенные данные относятся к воде, находящейся в «свободном» состоянии. При связывании воды она теряет подвижность в электрическом поле и ее диэлектрическая проницаемость умень-

шается по мере увеличения энергии связи. Для наиболее прочной формы связи — химической — считают диэлектрическую проницаемость воды $\varepsilon_{св} \approx \varepsilon_{\infty}$.

Электрические свойства воды резко изменяются при изменении ее агрегатного состояния. ε и $\operatorname{tg}\delta$ льда зависят от частоты тока, температуры и наличия примесей в воде и сильно отличаются от параметров жидкой воды. На сверхвысоких частотах в диапазоне температур $-50 \div 0$ °С для льда $\varepsilon = 3{,}05$ (при длине волны $\lambda = 3$ *см*) и 3,17 (при $\lambda = 1{,}25$ *см*).

Близость значений электрических параметров льда и сухого вещества (см. ниже) имеет важное следствие — для определения содержания влаги в твердой фазе нельзя применять диэлькометрический метод.

Диэлектрические проницаемости воздуха и других газов и их зависимость от концентрации водяного пара рассматриваются в § 9-1; при оценке электрических свойств влагосодержащих твердых материалов и жидкостей их значения можно считать равными единице. Более сложный характер имеют диэлектрические свойства «сухой» части влагосодержащих материалов.

При отсутствии влаги капиллярнопористые материалы и жидкие неполярные и слабополярные вещества имеют очень низкую диэлектрическую проницаемость и малые диэлектрические потери. В табл. 2-2 даны средние значения ε различных влагосодержащих материалов в обезвоженном состоянии при комнатной температуре. Результаты измерений электрических параметров материалов, полученные различными исследователями, часто отличаются вследствие использования разных методик измерения и различий использованных образцов. Поэтому данные табл. 2-2 должны рассматриваться как

Таблица 2-2

Материал	ε	Материал	ε
Кожа	1,3	Уголь	2,5
Нефти	2,0—2,7	Животные жиры	3—3,5
Зерновая масса	2	Древесина	1,6—4
Бумага	1,5—3	Гипс	5,5
Хлопчатобумажные ткани	2—2,5	Каменная соль	5—6
Минеральные и растительные масла	2—3	Целлюлоза	6,5
		Крахмал	10

приблизительные; в то же время они показывают большое отличие ε воды от ε сухих материалов.

Даже сильно полярные жидкости имеют значительно более низкие значения ε, чем вода (см. § 3-1).

Наличие влаги оказывает большое влияние на поляризацию неоднородных диэлектриков сложного состава, какими являются влажные материалы.

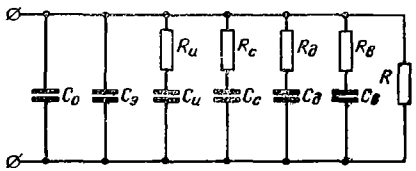


Рис. 2-2. Схема замещения сложного поляризованного диэлектрика.
C_0 — емкость в вакууме; $C_э$ — емкость электронной поляризации; $C_и$ — емкость ионной поляризации; $C_с$ — емкость структурной поляризации; $C_д$ — емкость дипольной поляризации; $C_в$ — емкость внутрислойной полярнзации; $R_и$, $R_с$, $R_д$, $R_в$ — эквивалентные сопротивления потерь при разных видах поляризации; R — сопротивленне сквозному току.

В общем случае в сложном диэлектрике могут иметь место следующие основные виды поляризации: электронная, ионная, дипольная, структурная и внутрислойная. В зависимости от особенностей материала различные виды поляризации могут иметь больший или меньший удельный вес, а некоторые из них могут и вовсе отсутствовать. Суммарная поляризация вещества представляет собой сумму всех имеющихся видов поляризации. Потери утечки являются лишь одной из составляющих суммарных потерь в переменном поле; дополнительные потери вызваны различными видами поляризации. Схема замещения рассматриваемого диэлектрика содержит геометрическую емкость (емкость, соответствующую полю электродов в вакууме) и сумму емкостей, обусловленных различными видами поляризации. Последние емкости (кроме емкости электронной поляризации) в схеме замещения имеют последовательные сопротивления, учитывающие потери за счет этих видов поляризации. Кроме того, в схеме введено активное сопротивление, величина которого зависит от сквозного тока проводимости между электродами. Полная схема замещения поляризованного диэлектрика показана на рис. 2-2. Таким образом, поляризация влагосодержащего материала имеет сложный характер, и во всех случаях полное сопротивление датчика с материалом является комплексной величиной.

Поляризация при переменном токе определяет комплексную проводимость диэлектрика: реактивная составляющая последней связана с диэлектрической проницаемостью, активная — с диэлектрическими потерями.

Второе важное для измерений влажности проявление поляризации материалов заключается в отчетливо выраженной зависимости их электрических параметров от частоты поля.

У многих капиллярнопористых материалов область дисперсии значительно шире, чем по Дебаю, и критическая частота материала в целом отличается от критической частоты воды, являющейся включением в непроводящую и нерелаксирующую среду (сухое вещество). Иногда наблюдается больше одной области дисперсии и больше одного максимума ε''.

В гетерогенных системах, содержащих воду, необходимо дополнительно принять во внимание следующие факторы:

а) наличие двойного поляризованного слоя частиц, следствием которого могут являться значения ε более высокие, чем у воды;

б) высокая поверхностная проводимость частиц или включений.

С учетом указанных эффектов в [Л. 2—4] дана характеристика факторов, обусловливающих диэлектрические потери в гетерогенных водосодержащих системах, в широком диапазоне частот (рис. 2-3). В области низких частот имеет место наложение многих эффектов; в диапазоне СВЧ (выше 10^9 *гц*) основным видом являются релаксационные потери, связанные с поляризацией свобод-



Рис. 2-3. Диэлектрические потери в гетерогенных системах, содержащих воду.

а — отсутствие поверхностных эффектов; *б* — потери, вызванные поверхностными эффектами; - - - — продолжение для воды, содержащей ионы.

ной воды. Это объясняет различия в характеристиках диэлькометрического метода, соответствующие разным диапазонам частот.

Ряд исследователей дополнил теорию Дебая и предложил соотношения, лучше описывающие поляризацию в гетерогенных системах, содержащих полярные молекулы; эти соотношения в некоторых случаях применимы и к влажным материалам. В качестве примера укажем на диаграмму Коул-Коула, т. е. круговую диаграмму в координатах $\varepsilon''(\varepsilon')$, соответствующую уравнению

$$\varepsilon^* - \varepsilon_\infty = \frac{\varepsilon_0 - \varepsilon_\infty}{(1 + j\omega\tau)^{1-\alpha}},$$

где α — эмпирическая постоянная ($0 \leqslant \alpha \leqslant 1$), описывающая расширение релаксационной области. Диаграмма представляет собой дугу окружности, центр которой лежит ниже действительной оси, образуя с ней угол $\alpha\pi/2$ (для уравнения Дебая $\alpha=0$). Была доказана возможность применения этой диаграммы для построения частотно-влажностных характеристик многих материалов, а также для определения некоторых параметров диэлькометрических влагомеров СВЧ [Л. 2-5].

В качестве математических моделей влажных материалов могут служить «диэлектрические формулы смесей», т. е. зависимости, связывающие диэлектрическую проницаемость n-фазной смеси с диэлектрическими проницаемостями и объемными концентрациями отдельных компонентов. Такого рода формулы предлагались различными исследователями уже на протяжении почти 100 лет. Приведем лишь те из них, которые использовались в работах по измерениям влажности; теоретические предпосылки, на которых основаны эти формулы, рассмотрены в литературе по физике диэлектриков.

Примем следующие обозначения:

ε, ε_0, $\varepsilon_в$ — диэлектрические проницаемости соответственно смеси, дисперсионной среды и дисперсной фазы;

$\delta = V_в/V$ — объемная концентрация дисперсной фазы (V, $V_в$ — объемы смеси и дисперсной фазы соответственно).

При рассмотрении n-компонентной смеси индексы i, n относятся к i-му, n-му компонентам.

Формула Вагнера:

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \left(1 + 3\delta \frac{\varepsilon_в - \varepsilon_0}{\varepsilon_в + 2\varepsilon_0}\right).$$

Формулы Винера, Лоренц—Лорентца, Клаузиуса—Моссотти:

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \left(1 + \frac{3\delta}{\dfrac{\varepsilon_в + \varepsilon_0}{\varepsilon_в - \varepsilon_0} - \delta}\right). \qquad (2\text{-}7)$$

Винер предложил учитывать расположение частиц дисперсной среды относительно направления электрического поля «коэффициентом смеси» n $(0 \leqslant n \leqslant \infty)$; уравнение Винера, применимое и для комплексной диэлектрической проницаемости, имеет вид:

$$\frac{\varepsilon - 1}{\varepsilon + n} = \delta \frac{\varepsilon_в - 1}{\varepsilon_в + n} + (1 - \delta) \frac{\varepsilon_0 - 1}{\varepsilon_0 + n}. \qquad (2\text{-}8)$$

Экстремальными значениями ε являются:

а) максимальное при $n = \infty$, соответствующее расположению дисперсных частиц (цилиндрических, плоских, эллипсоидальных) с большой осью, параллельной направлению поля. В этом случае

$$\varepsilon_{макс} = \delta\varepsilon_в + (1 - \delta)\varepsilon_0;$$

б) минимальное при $n = 0$ для частиц с большой осью, перпендикулярной направлению поля:

$$\frac{1}{\varepsilon_{мин}} = \delta \frac{1}{\varepsilon_в} + (1 - \delta) \frac{1}{\varepsilon_0}.$$

Для промежуточных значений n, соответствующих любому расположению частиц между указанными крайними, диэлектрическая проницаемость смеси примет значение $\varepsilon_{мин} < \varepsilon < \varepsilon_{макс}$.

Формулы Бруггемана. Экстремальные значения ε даны в зависимости от формы дисперсных частиц при их произвольном расположении относительно поля.

Для случая сферических частиц:

$$\frac{\varepsilon_в - \varepsilon}{\varepsilon_в - \varepsilon_0} = (1 - \delta) \sqrt[3]{\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0}};$$

для частиц в форме плоских дисков:

$$\frac{\varepsilon_в - \varepsilon}{\varepsilon_в - \varepsilon_0} = (1 - \delta) \frac{2\varepsilon_в + \varepsilon}{2\varepsilon_в + \varepsilon_0}.$$

Формула Лихтенекера. Распространенной формулой для расчета обобщенной проводимости Λ (например, электрической проводимости σ, диэлектрической проницаемости ε, магнитной проницаемости μ, теплопроводности λ) является степенная или «логарифмическая»:

$$\Lambda^k = \sum_{i=1}^{n} \delta_i \Lambda_i^k,$$

на основании которой для случая двухкомпонентной смеси получаем:

$$\lg \varepsilon = \delta \lg \varepsilon_в + (1 - \delta) \lg \varepsilon_0.$$

Формула Оделевского. Обобщенная проводимость гетерогенной системы, представляющей собой многофазную статическую смесь невытянутых частиц, вычисляется из уравнения

$$\sum_i \frac{\Lambda_i - \Lambda}{\Lambda_i + 2\Lambda} \delta_i = 0.$$

Формула Оделевского в записи для двухфазной системы аналогична формуле (2-8).

Недостатком формул Лихтенекера и Оделевского является их симметрия относительно обеих фаз, противоречащая экспериментальным данным, согласно которым при обращении фаз двухфазной системы (например, эмульсия вода — масло) происходит резкое изменение ее диэлектрической проницаемости.

Остальные приведенные формулы, а также ряд других (формулы Релея, Пьекара, Фрадкиной, Беттхера и т. д.) имеют аналогичную структуру и мало отличаются друг от друга. В этом можно убедиться, применив для них единую форму записи в виде степенного ряда по величине δ [Л. 1-8]; как правило, расхождения появляются лишь начиная с члена третьего порядка, т. е. при больших влагосодержаниях.

Близость основных формул диэлектрических смесей позволяет рассматривать их как частные случаи одной общей формулы, отличающейся только приближениями, сделанными при их выводе. Такая обобщенная формула, предложенная Рейнольдсом и Хью, имеет форму:

$$\varepsilon=\varepsilon_0+\varepsilon_0\delta(\varepsilon_в-\varepsilon_0)[\varepsilon_0+A(\varepsilon_в-\varepsilon_0)]^{-1}, \qquad (2\text{-}9)$$

где A — коэффициент, зависящий от отношения осей эллипсоидальной частицы и ее ориентации относительно поля.

Для сфер $A=1/3$ и (2-9) превращается в известную формулу Максвелла.

На основе приведенного обзора можно сделать вывод об отсутствии в настоящее время универсальной аналитической модели диэлектрических свойств гетерогенных систем вообще и дисперсных влагосодержащих тел в частности. Лишь в отдельных простых случаях экспериментальные данные хорошо совпадают с результатами расчетов по тем или иным формулам смеси. Так, например, в [Л. 2-6] была обоснована возможность применения соотношения (2-7) при расчетной градуировке диэлькометрических влагомеров для жидких нефтепродуктов.

Одна из основных причин неудовлетворительности известных формул смеси при их применении к капиллярнопористым влажным материалам — отсутствие учета влияния видов и форм связи влаги на электрические свойства материала. Эти формулы соответствуют лишь грубой бинарной модели «сухое вещество — свободная влага». Необходимость учета указанного важнейшего фактора (одним из первых ее отметил О. Д. Куриленко) нашла выражение в ряде работ. Пальмер [Л. 2-7] предложил для глины модель в виде равномерно распределенных частиц твердой фазы в воздушной матрице. По мере увлажнения глины вода вытесняет воздух, а диэлектрическая проницаемость воды ε_{H_2O} изменяется от $\varepsilon_x=3$ (для химически связанной влаги) до $\varepsilon_{св}\approx 80$ (для свободной) в функции влагосодержания u по экспоненциальному закону:

$$\varepsilon_{H_2O}=\varepsilon_{св}-(\varepsilon_{св}-\varepsilon_x)\,e^{-\alpha u}, \qquad (2\text{-}10)$$

где α — постоянный коэффициент, зависящий от сорта глины (например, $\alpha=0{,}044$). При использовании (2-10) экспериментальные зависимости $\varepsilon(u)$ для глины хорошо совпадали с результатами расчета по формуле Бруггемана.

При измерениях влажности песка и гипса на частоте 10,69 *Гц* [Л. 2-8] для оценки степени связи воды с сухим веществом использовался коэффициент смеси из уравнения (2-8). Переходу от одной формы связи к другой (для песка и гипса при объемных влагосодержаниях, близких к 10 и 20%) соответствовало резкое изменение значений коэффициента n. Обе рассмотренные работы лишены физического обоснования и представляют лишь попытку аппроксимации экспериментальных данных с введением эмпирических коэффициентов, характеризующих влияние изменения форм связи влаги.

Основой для изучения электрических свойств влагосодержащих тел остаются экспериментальные данные.

2-3. ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВЛАГОСОДЕРЖАЩИХ МАТЕРИАЛОВ

Характеристиками, используемыми в диэлькометрическом методе, являются зависимости удельных электрических параметров материала от его влажности, свойств и состояния, а также от условий измерения:

а) влажностные характеристики электрических параметров материала — зависимости ε и $\operatorname{tg}\delta$ или других параметров, в том числе и комплексных, от его влажности W (или влагосодержания u) при постоянных значениях частоты поля f, температуры материала t, степени уплотнения (для дисперсных материалов) и других величин, влияющих на результаты измерения;

б) частотные характеристики-функции $\varepsilon(f)$ и $\operatorname{tg}\delta(f)$ при постоянстве W, t и других величин, характеризующих состояние материала;

в) температурные характеристики — функции $\varepsilon(t)$ и $\operatorname{tg}\delta(t)$ при постоянстве W, f и других факторов;

г) характеристики, описывающие зависимость электрических параметров материала от его состава, плотности, распределения влаги и т. д.

Имеется большое количество экспериментальных данных о диэлектрических характеристиках влагосодержащих материалов. Использование этих данных требует, однако, определенной осторожности, так как результаты измерений, проведенных в разных условиях и по различным методам, не совпадают, а иногда противоречат друг другу. Недостатком большинства экспериментальных работ является также то, что они охватывают измерения лишь одного или нескольких материалов в ограниченном диапазоне частот и, следовательно, не дают возможности получить достаточно общие выводы.

В последние годы в СССР и за рубежом был выполнен ряд работ, относящихся к влажностным и частотным характеристикам влажных материалов в широком диапазоне частот и позволяющих выявить некоторые общие закономерности [Л. 0-1, 2-9—2-12].

В этих исследованиях использовалась разнообразная измерительная аппаратура. На звуковых и низких радиочастотах — до 100—150 *кгц* — основным измерительным прибором служил мост переменного тока с питанием от генератора звуковой частоты. В диапазоне радиочастот от средних до метровых волн ($f=0{,}1\div 50$ *Мгц*) наибольшее применение нашли широкополосные радиочастотные мосты с уравновешиванием по модулю и фазе, например выпускаемый в СССР мост типа Е10-2 (ИППМ-1). Параллельно с этим для частот 0,1—100 *Мгц* применялись куметры по разработанной А. В. Нетушилом и его сотрудниками методике измерения параметров материалов с большими диэлектрическими потерями и учета влияния паразитных параметров датчика и измерительного контура [Л. 2-13]. Снятие характеристик на перечисленных приборах требует больших затрат времени; в процессе измерения может измениться влажность образцов. Поэтому заслуживает внимания возможность некоторой автоматизации получения частотных характеристик на основе применения генератора качающейся частоты с непосредственным наблюдением амплитудно-частотной характеристики на экране осциллографа [Л. 2-14] или ее записью с помощью двухкоординатного самописца [Л. 2-10].

Для измерений параметров диэлектриков на сверхвысоких частотах были разработаны многочисленные методы и установки [Л. 2-15]. Исследования влажных материалов выполнялись чаще всего методами измерений в свободном пространстве (см. § 4-3). Более точные значения электрических параметров позволяют получить волноводные методы, например метод «бесконечного слоя» в модификации с согласованной нагрузкой (с высокими потерями), имеющей прямой контакт с образцом материала [Л. 2-16], а также резонаторные методы.

Перейдем к рассмотрению основных характеристик.

Влажностные характеристики служат основой градуировки влагомеров и в значительной степени определяют их метрологические свойства. Линейные влажностные характеристики имеют лишь немногие ма-

териалы. К ним относятся некоторые жидкие диэлектрики; у твердых материалов такой характер зависимости встречается реже и только для узких диапазонов влагосодержания.

У подавляющего большинства материалов ε и $\operatorname{tg}\delta$ увеличиваются с ростом влажности быстрее, чем следовало бы при наличии линейного закона; относительная крутизна характеристики $\operatorname{tg}\delta(W)$, как правило, больше, чем характеристики $\varepsilon(W)$.

Зависимости $\varepsilon(W)$ при разных условиях измерения можно описать монотонно возрастающими функциями. В широком диапазоне влагосодержаний их можно аппроксимировать ломаной прямой, состоящей из двух отрезков с одной сопрягающей—«критической» влажностью $W_{кр}$ (рис. 2-4). На участке $W<W_{кр}$ крутизна характеристики (и соответствующая ей чувствительность влагомера) значительно меньше, чем на участке $W>W_{кр}$. Такой характер был установлен для зависимостей $\varepsilon'(W)$ и $\varepsilon''(W)$ многих материалов при частотах порядка нескольких мегагерц и на СВЧ, а также для зависимостей от влажности ослабления A и фазового сдвига проходящей волны сантиметрового диапазона; это отражает зависимость электрических свойств материала от состояния и форм связи влаги. Сингулярная точка (с абсциссой, равной $W_{кр}$) приблизительно соответствует переходу от мономолекулярного слоя к влаге полимолекулярной адсорбции. В области $W<W_{кр}$ энергия связи воды весьма значительна и диэлектрическая проницаемость, определяемая в основном электронной и атомной поляризацией, мала и зависит главным образом от ε сухого вещества. В области преобладания свободной влаги ($W>W_{кр}$) происходит плавное уменьшение энергии связи, увеличение подвижности молекул воды и связанное с этим увеличение диэлектрической проницаемости системы.

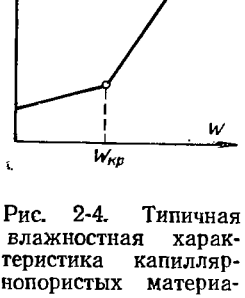


Рис. 2-4. Типичная влажностная характеристика капиллярнопористых материалов.

Характеристики материалов, состоящих из компонентов, различных по своим водоудерживающим свойствам (и соответствующим им энергиям связи воды), могут

иметь больше одной сингулярной точки. На положение этой точки оказывают некоторое влияние также степень дисперсности системы и частота поля.

Что касается абсолютных значений ε' и ε'', то при постоянной частоте они определяются (особенно в области $W > W_{кр}$) не столько электрическими параметрами сухого вещества, сколько его водоудерживающими свойствами и пористой структурой.

При сравнении зависимостей $\varepsilon'(W)$ и $\varepsilon''(W)$ различных категорий твердых материалов (макропористых, поликапиллярнопористых, коллоидных-капиллярнопористых



Рис. 2-5. Зависимости $\varepsilon(W)$ (*а*) и $\operatorname{tg}\delta(W)$ (*б*) твердых материалов.
1 — окись алюминия; *2* — зерно; *3* — табак; *4* — уголь; *5* — песок; *6* — гравий.

и коллоидных) наблюдается перемещение этих характеристик в сторону оси W по мере увеличения активной поверхности (площади поверхности микро- и макрокапилляров). Выше других проходят кривые $\varepsilon'(W)$ и $\varepsilon''(W)$ песка и гравия, которые почти не содержат влаги микропор и адсорбированной. Вполне закономерно также увеличение «критической» влажности $W_{кр}$ с повышением гигроскопичности материала.

Такой вид имеют влажностные характеристики в различных, далеких друг от друга диапазонах частот. На рис. 2-5 показаны экспериментальные зависимости $\varepsilon(W)$ и $\operatorname{tg}\delta(W)$, полученные при частоте 500 *кгц* [Л. 2-17], а на рис. 2-6 — зависимости $\varepsilon'(W)$ и $\varepsilon''(W)$ на частоте 9,4 *Гц* [Л. 2-9] для группы типичных материалов, отличающихся гигроскопическими свойствами.

Частотные характеристики влагосодержащих материалов имеют форму, обусловленную неодинаковым влиянием частоты на разные виды поляризации. Это влияние различно в зависимости от содержания, состояния и форм связи влаги в материале; ввиду этого целесообразно рассматривать комбинированные частотно-влажностные характеристики материалов.

Характеристика природы диэлектрических потерь в широком диапазоне частот (рис. 2-3) показывает, что в области низких частот преобладающее значение имеют потери, связанные со сквозной проводимостью. В этом диапазоне значения ε определяются главным образом

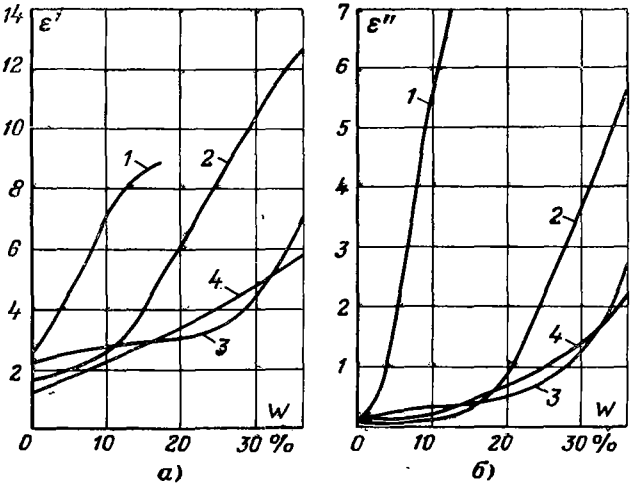


Рис. 2-6. Зависимости $\varepsilon'(W)$ (*а*) и $\varepsilon''(W)$ (*б*) на СВЧ.
1 — песок; *2* — полнамид; *3* — картофельная мука; *4* — силикагель.

медленными видами поляризации; большое значение имеет поверхностная проводимость.

По мере роста частоты возрастает роль релаксационных процессов. В диапазоне от 10^5 до $(10^7 \div 0{,}5 \cdot 10^8)$ *гц* с ростом частоты наблюдается плавное уменьшение ε, сначала резкое, а затем замедленное.

Примером типичной частотно-влажностной характеристики для этого диапазона может служить зависимость $\varepsilon(W, f)$ для хлопка-сырца с влажностью $10 \leqslant W \leqslant 20\%$

[Л. 2-18]:

$$\lg \varepsilon = A + BW^2 10^{-C \lg f},$$

где A, B, C — постоянные, зависящие от сорта хлопка, его плотности, температуры, проводимости воды и т. д.

Зависимость $\operatorname{tg}\delta(f)$ при преобладании сквозной проводимости близка к гиперболической; с повышением частоты $\operatorname{tg}\delta$ уменьшается, стремясь к определенному пределу. Зависимость от частоты ε и $\operatorname{tg}\delta$ выражена более резко при высоких влагосодержаниях. При низких влагосодержаниях (точнее, в области превалирования связанной влаги) частотные зависимости электрических параметров имеют характер такой же, как у сухого материа-

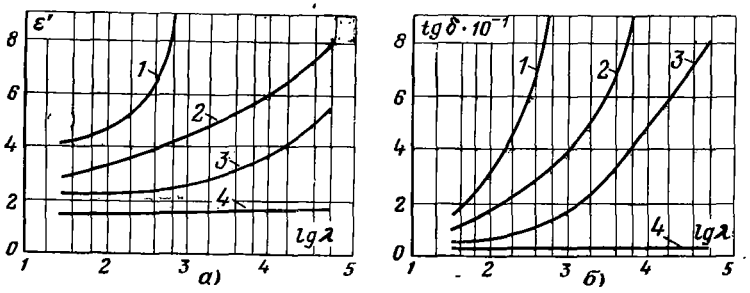


Рис. 2-7. Зависимость диэлектрических свойств целлюлозы от длины волны λ при влагосодержаниях:
1 — 30%; *2* — 18%; *3* — 12%; *4* — 4,5%.

ла (неполярного диэлектрика), — значения ε и $\operatorname{tg}\delta$ практически не зависят или очень мало зависят от частоты. С ростом влагосодержания увеличивается влияние частоты на ε' и ε''.

Иллюстрацией к сказанному могут служить экспериментальные характеристики целлюлозы (рис. 2-7) [Л. 2-19].

В рассматриваемом диапазоне частот (до 50 *Мгц*) при повышении частоты кривые $\varepsilon'(W)$ и $\varepsilon''(W)$ становятся более пологими и чувствительность диэлькометрического влагомера уменьшается.

В широком диапазоне частот характеристики $\varepsilon'(f)$ и $\varepsilon''(f)$ имеют одну или несколько областей дисперсии диэлектрической проницаемости, которым соответствуют максимумы диэлектрических потерь. Иногда в предшествующей области частот имеется другой экстремум — ми-

нимум ε″. Такие экстремумы (наблюдаемые у ряда материалов также на температурных характеристиках) особенно выражены в области полимолекулярной адсорбции, причем повышение влагосодержания перемещает максимум потерь в сторону более высоких частот.

При измерениях на СВЧ по методу ослабления в свободном пространстве укорочение длины волны влечет за собой (при прочих равных условиях) увеличение абсолютной величины ослабления, т. е. повышение чувствительности влагомера; причем влияние повышения частоты растет с увеличением влажности. Это было установлено для твердых материалов различной структуры [Л. 2-20], а также для нефтей с низким влагосодержанием [Л. 2-21].

Глава третья

ДАТЧИКИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ВЛАГОМЕРОВ

3-1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ

Датчики кондуктометрических и диэлькометрических влагомеров преобразуют электрические параметры твердых и жидких материалов (ρ, ε, $tg\,\delta$) в электрическую величину: омическое сопротивление, емкость, активное, реактивное или полное сопротивление в цепи переменного тока. Чувствительный элемент датчика — это электродное устройство, состоящее из двух электродов, из нескольких электродов, соединенных электрически в две группы, или из одного электрода, образующего с поверхностью нулевого потенциала («землей») систему двух проводящих тел.

Датчики влажности можно классифицировать по ряду признаков:

1. Метод измерения, для которого предназначен датчик.

2. Агрегатное состояние и внешняя структура анализируемых материалов.

3. Условия работы влагомера — датчики для непрерывных или дискретных измерений.

4. Способ подвода материала к чувствительному элементу (проточные и погружные датчики).

По принятой классификации следовало бы раздельно рассмотреть датчики кондуктометрические и диэлькометрические. Однако выходная величина датчика зависит от схемы и параметров электрического измерительного устройства, в которое он входит, от рода и частоты тока в этом устройстве. Один и тот же преобразователь с исследуемым материалом в междуэлектродном пространстве можно рассматривать как омическое сопротивление, если измерение производится в цепи постоянного тока, или как конденсатор при измерениях переменным током повышенной частоты. Поэтому целесообразно рассмотреть общие свойства датчиков, применяемых в обоих электрических методах. Исключение составляют датчики некоторых типов, специфические для одного из методов (четырехэлектродные — для кондуктометрического[1]), датчики без гальванического контакта между электродами и исследуемым материалом).



Рис. 3-1 Схема измерения четырехэлектродным датчиком.

Принцип устройства и работы четырехэлектродного датчика поясняет его принципиальная схема (рис. 3-1). Четыре игольчатых электрода приложены к поверхности исследуемого материала. Через два электрода *1* и *4* пропускают постоянный ток *I*, а между внутренними электродами *2* и *3* измеряют при помощи вольтметра с малым потреблением тока (ламповый вольтметр с большим входным сопротивлением, нулевая компенсационная схема) падение напряжения U на определенном участке цепи. При известных расстояниях между электродами по измеренным величинам U и I можно определить удельное объемное сопротивление ρ материала. Приведенные ниже зависимости справедливы только при соблюдении некоторых условий.

Материал в исследуемом объеме должен быть однородным и изотропным в отношении проводимости и должен иметь плоскую поверхность; поверхностные токи между электродами должны отсутствовать. Все четыре

[1] В принципе возможно применение четырехэлектродного датчика и в диэлькометрических влагомерах, основанных на измерении сдвига фазы [Л. 3-1].

электрода располагают на одной прямой; площадь контакта с материалом должна быть минимальной («точечный контакт»). При измерениях на большом образце материала электроды достаточно удалены от всех поверхностей материала, кроме исследуемой, и среду можно считать полубесконечной. В этом случае

$$\rho = \frac{U}{I} 2\pi \left(\frac{1}{d_1} + \frac{1}{d_3} - \frac{1}{d_1 + d_2} - \frac{1}{d_2 + d_3} \right)^{-1}, \qquad (3\text{-}1)$$

где d_1, d_2, d_3 — расстояния между электродами, показанные на рис. 3-1.

Если расстояния между электродами равны, т. е. $d_1 = d_2 = d_3 = d$, то

$$\rho = \frac{U}{I} 2\pi d. \qquad (3\text{-}2)$$

Как вытекает из уравнений (3-1) и (3-2), во всех случаях применения четырехэлектродного датчика результат измерения удельного сопротивления материала не зависит от величины переходных сопротивлений электрод — материал. Это объясняется тем, что переходные сопротивления токовых электродов в одинаковой степени влияют на величины U и I, а переходные сопротивления потенциальных электродов при применении нулевого компенсационного метода не влияют на результат измерения U. Указанное свойство является существенным преимуществом четырехэлектродных датчиков по сравнению с двухэлектродными.

Четырехэлектродные датчики нашли ограниченное практическое применение при измерениях влажности почв и некоторых строительных материалов.

Перейдем к рассмотрению функции преобразования датчиков, пригодных как для кондуктометрического, так и диэлькометрического метода. Эта функция описывает статическую характеристику датчика. Что касается динамических свойств, то при равномерном распределении влаги в материале датчик электрического влагомера можно рассматривать как безынерционное звено, что является одним из преимуществ электрических методов измерения влажности по сравнению с многими другими методами. Исключение составляют кондуктометрические влагомеры постоянного тока, у которых наблюдается явление убывания тока во времени (см. § 4-1).

В первую очередь рассмотрим статические характеристики двух типов датчиков, часто применяемых в электрических влагомерах:

а) Датчики с плоскими электродами, прилегающими к одной поверхности материала и расположенными в одной плоскости («копланарный» датчик).

При соприкосновении материала с электродами (или приближении материала к ним) изменяется краевая емкость датчика. Такие датчики именуют иногда конденсаторами с продольным или параллельным «внешним» полем в отличие от обычных конденсаторов, у которых «внутреннее» поле направлено поперек материала, находящегося между обкладками. «Односторонние» датчики измеряют проводимость и емкость слоев материала, близких к поверхности. Напряженность поля в материале является функцией расстояния от контролируемой поверхности. Расчет датчиков этого типа рассматривается в [Л. 2-13 и 3-1].

б) Датчик с одиночным электродом в виде проводящего стержня конечной длины. У такого датчика измеряются емкость и проводимость относительно земли; эти величины зависят от электрических параметров среды, окружающей электрод, его размеров и расположения относительно земли.

Емкость вертикального тонкого кругового цилиндра длиной L и радиусом R, нижний конец которого находится на расстоянии H от поверхности нулевого потенциала, можно рассчитать по формуле

$$C = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon L}{2 \ln \left[\frac{4H}{R\left(1 + \sqrt{1 + \frac{16H^2}{L^2}}\right)} \right]}. \qquad (3\text{-}3)$$

Поле электрода имеет форму, при которой поверхностями равного потенциала являются поверхности эллипсоидов с электродом в качестве длинной оси.

Если принять соотношения между размерами электрода и его расстоянием от земли $H \gg L \gg R$, можно получить из (3-3) приближенную формулу для расчета емкости

$$C = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon L}{2 \ln \frac{L}{R}}. \qquad (3\text{-}4)$$

При применении электрических методов измерения влажности встречается необходимость определения электрических параметров материала по результатам измерения емкости и сопротивления при известных параметрах датчика или расчета емкости и сопротивления датчика при известных параметрах материала. Диэлектрическую проницаемость материала нельзя определить по отношению емкости конденсаторного датчика с материалом между обкладками к емкости пустого датчика. Конденсаторные датчики, кроме части, заполняемой исследуемым веществом («воздушная емкость» C_0), всегда имеют выводы, изоляционные и другие детали, создающие дополнительную емкость $C_н$, которая имеет постоянное значение для данного датчика. В величину $C_н$ входит, в частности, емкость незаземленной обкладки относительно земли. Наконец, «краевой эффект», т. е. искривление линий поля у краев обкладок конденсатора, создает краевую емкость $C_к$, величина которой зависит от положения диэлектрика относительно краев обкладки и от его диэлектрических свойств.

Наиболее точным способом определения параметров датчика является калибровка, осуществляемая измерением его емкости или проводимости при заполнении жидкими веществами, удельная проводимость и диэлектрическая проницаемость которых известны с достаточной точностью; при калибровке конденсатора возможно применение и газообразных эталонных веществ. В общем случае суммарная емкость датчика, заполненного исследуемым веществом (если пренебречь индуктивностью и активным сопротивлением датчика), равна:

$$C_x = \varepsilon C_0 + C_н + C_к. \qquad (3\text{-}5)$$

Измерение емкости датчика при заполнении его двумя эталонными веществами, диэлектрические проницаемости которых равны ε_1 и ε_2, позволяет вычислить из (3-5) параметры датчика — рабочую (воздушную) емкость C_0 и сумму паразитных емкостей $C_н + C_к$:

$$C_0 = \frac{C_{x1} - C_{x2}}{\varepsilon_1 - \varepsilon_2}; \qquad (3\text{-}6)$$

$$C_н + C_к = C_{x_1} - \varepsilon_1 \frac{C_{x1} - C_{x2}}{\varepsilon_1 - \varepsilon_2} = C_{x_2} - \varepsilon_2 \frac{C_{x1} - C_{x2}}{\varepsilon_1 - \varepsilon_2}, \qquad (3\text{-}7)$$

где C_{x1} и C_{x2} — измеренные значения емкости конденсатора при заполнении его веществами с диэлектрическими проницаемостями, равными соответственно ε_1 и ε_2.

Возможные расхождения между значениями $C_н+C_к$, полученными с первым и вторым веществом, обусловлены погрешностями измерения и непостоянством паразитных емкостей датчика.

Эталонное вещество должно быть абсолютно чистым, обладать высокой химической устойчивостью и минимальной электропроводностью и не вступать в химические реакции с материалами датчика. Практически для калибровки используются чаще всего сухой воздух и бензол. Для воздуха $\varepsilon=1{,}00058\pm0{,}00001$ при давлении 760 *мм рт. ст.* и температуре 0 °С. Диэлектрическая проницаемость чистого бензола при 20 °С равна 2,2826, температурный коэффициент $\Delta\varepsilon/\Delta t=-0{,}0019$. Кроме того, используются смеси диоксана с водой [Л. 3-2], позволяющие в зависимости от отношения компонентов получить любую величину ε от 2,235 (для чистого диоксана) примерно до 81 (вода), а также некоторые другие жидкости, перечисленные в табл. 3-1.

Таблица 3-1

Эталонная жидкость	ε при 20°С	Эталонная жидкость	ε при 20°С
Четыреххлористый углерод	2,24	Пиридин	12,4
Трихлорэтилен	3,43	Бензальдегид	13,8
Хлороформ	4,81	Ацетон	21,4
Монохлорбензол	5,54	О-нитротолуол	27,1
Хлористый этилен	10,5	Метанол	33,8
		Нитробензол	35,7

Рассмотрим теперь специфические свойства датчиков диэлькометрических влагомеров.

Электрической моделью так называемого емкостного датчика влажности, т. е. включенного в цепь переменного тока конденсаторного датчика с исследуемым материалом в междуэлектродном пространстве, является его схема замещения. Эта схема определяется физическими процессами в диэлектрике (влагосодержащем материале) и, в значительно меньшей степени, конструкцией датчика. Рассмотренная выше схема замещения сложного поляризованного диэлектрика (рис. 2-2) приводит к схеме датчика, изображенной на рис. 3-2,*а*. Емкость $C_1=C+C_э$ равна сумме рабочей и паразитной емкостей датчика и емкости электронной поляризации; C_2 — емкость, созда-

ваемая остальными видами поляризации. Сопротивление сквозному току обозначено R_1, эквивалентное сопротивление поляризационных потерь различных видов — R_2. При повышенной частоте приходится учитывать активное сопротивление r электродов и их выводов, а также паразитную индуктивность L датчика. Для упрощения можно принять, что величина L (и индуктивность датчика в воздухе) не изменяется при введении исследуемого материала в датчик.

Приведенная общая схема замещения содержит элементы, которые трудно определить экспериментом; для практического использования целесообразно ее упростить. При частотах ниже 25—30 *Мгц* роль индуктивного



Рис. 3-2. Схемы замещения емкостного датчика влажности.

сопротивления незначительна и индуктивность L можно исключить из схемы; можно также пренебречь сопротивлением r, так как обычно $r \ll R$. Схема сводится к схеме замещения исследуемого материала. Если объединить в ней все емкости, а суммарное сопротивление потерь обозначить через R, получим упрощенную параллельную схему (рис. 3-2,*б*), состоящую из емкости C без потерь, шунтированной активным сопротивлением R. Можно также пользоваться последовательной схемой (рис. 3-2,*в*), в которой емкость C' и сопротивление R' включены последовательно. Переход от параметров параллельной схемы к параметрам последовательной выполняется легко, если учесть, что $\operatorname{tg}\delta = \dfrac{1}{RC\omega} = R'C'\omega$.

Известно, что критерием правильности схемы замещения является точность аппроксимации характеристик

реального объекта, в нашем случае — величин модуля и аргумента полного сопротивления датчика в достаточно широком диапазоне частот.

Задачу синтеза более точных схем замещения датчика для определенного материала (или группы материалов) можно решить, используя экспериментальные частотные характеристики, например, $C(\omega)$ и $\operatorname{tg}\delta(\omega)$ для данного материала и критерий минимизации среднеквадратичных отклонений характеристик схемы замещения от экспериментальных. Так, для нефти и водонефтяных эмульсий была предложена схема замещения (рис. 3-2,*г*), параметры которой можно определить графоаналитическим способом по экспериментальной характеристике $\operatorname{tg}\delta(\omega)$ [Л. 1-8].

Однако даже для одного материала построение универсальной схемы замещения, обладающей достаточной точностью в широком диапазоне влагосодержаний, является весьма сложной и пока еще не решенной задачей. Поэтому при исследовании общих свойств диэлькометрических влагомеров широко используют упрощенные модели — схемы замещения по рис. 3-2,*б* и *в*. Из уравнения $C'=C(1+\operatorname{tg}^2\delta)$ вытекает, что величины емкости по обеим схемам равны только при соблюдении условия $\operatorname{tg}\delta \ll 1$. Исходя из удобства математических операций, можно пользоваться последовательной или параллельной схемой замещения. Для влагосодержащих диэлектриков параллельная схема с постоянными значениями параметров отражает реальные характеристики датчика с материалом лучше, чем последовательная схема. Так, например, последовательная схема исключает возможность прохождения постоянного тока между электродами. Кроме того, у большинства влагосодержащих материалов $\operatorname{tg}\delta$ уменьшается с ростом частоты, что также соответствует параллельной схеме замещения; при последовательной схеме $\operatorname{tg}\delta$ растет с увеличением ω. Поэтому в дальнейшем используется параллельная схема; применение последовательной схемы ограничено теми случаями, когда это упрощает расчеты.

Комплексное сопротивление параллельной схемы замещения датчика равно:

$$Z=\frac{R\,\frac{1}{j\omega C}}{R+\frac{1}{j\omega C}}=\frac{R}{1+j\omega RC}=\frac{R-j\omega R^2C}{1+\omega^2R^2C^2}.$$

Если учесть, что $RC=T$ (T — постоянная времени цепи датчика), можно написать:

$$Z=\frac{R}{1+j\omega T} \tag{3-8}$$

или в показательной форме

$$Z=Ae^{j\varphi}$$

с модулем $A=R/\sqrt{1+\omega^2T^2}$ и аргументом $\varphi=-\operatorname{arctg}\omega T$.

Характер полного сопротивления (т. е. преобладание в нем активной или реактивной составляющей) определяется частотой тока и постоянной времени контура датчика. Условием преобладания активной проводимости является $1/R\gg\omega C$ или $\omega T\ll 1$ ($\operatorname{tg}\delta\gg 1$). В этом случае $Z\approx R$. Емкостная проводимость преобладает при условии $\omega C\gg 1/R$ или $\omega T\gg 1$ ($\operatorname{tg}\delta\ll 1$); при этом условии $Z\approx 1/j\omega C$. Граничным условием, определяющим переход проводимости датчика от активной к емкостной, является $\omega T=1$, т. е. $\operatorname{tg}\delta=1$.

При измерениях влажности в переменном поле нашли широкое применение приемы измерения, описываемые схемой замещения на рис. 3-2,*д*. На этой схеме C_x зависит от диэлектрической проницаемости материала в датчике; R_x характеризует диэлектрические потери в датчике; C_0 представляет собой постоянную емкость, включенную последовательно с датчиком. Емкость C_0 практически осуществляется следующим образом: а) включением конденсатора постоянной емкости последовательно с датчиком; б) введением на всей площади обкладок конденсатора датчика прокладок из твердого диэлектрика; в) сохранением слоя воздуха между материалом и обкладкой конденсатора. Частным случаем конденсаторов с изоляционными прокладками являются конденсаторные датчики, применяемые в высокочастотном титровании и в высокочастотных концентратомерах для жидкостей. Эти «бесконтактные» датчики (точнее, датчики с наружными электродами) имеют электроды на внешней поверхности сосуда из диэлектрика, внутри которого находится исследуемый раствор. Емкость C_0 обусловлена диэлектрическими свойствами стенок сосуда между внешними обкладками и жидкостью. Схема на рис. 3-2,*д* может быть приведена к эквивалентной параллельной схеме на рис. 3-2,*е*. В дальнейшем активной проводимостью конденсатора C_0 пренебрегаем. Датчик по схеме

рис. 3-2,*д* защищен от короткого замыкания обкладок через материал, но влияние активной проводимости материала на параметры датчика не устраняется. Для пояснения этого рассмотрим параллельную схему замещения. Легко выразить активную и реактивную составляющие проводимости эквивалентной цепи через параметры датчика и последовательной емкости. Обозначим соответственно через $Y_э$, $G_э$, $B_э$ полную, активную и реактивную проводимости эквивалентной параллельной цепи. Полная проводимость эквивалентной цепи равна:

$$Y_э = \frac{1}{R_э} + j\omega C_э = G_э + jB_d. \qquad (3\text{-}9)$$

Полное сопротивление Z схемы на рис. 3-2,*е* может быть выражено через составляющие схемы рис. 3-2,*д* следующим образом:

$$Z = \frac{1}{Y_э} = \frac{1}{j\omega C_0} + \frac{1}{G_x + j\omega C_x}, \qquad (3\text{-}10)$$

где $G_x = 1/R_x$ — проводимость датчика с материалом.

Из (3-10) получаем:

$$Y_э = \frac{G_x\omega^2 C_0^2}{G_x^2 + \omega^2 (C_0 + C_x)^2} + j\,\frac{G_x^2\omega C_0 + \omega^3 C_0 C_x (C_0 + C_x)}{G_x^2 + \omega^2 (C_0 + C_x)^2}. \qquad (3\text{-}11)$$

Сравнивая (3-9) и (3-11), получаем:

$$G_э = \frac{G_x\omega^2 C_0^2}{G_x^2 + \omega^2 (C_0 + C_x)^2}; \qquad (3\text{-}12)$$

$$C_э = \frac{G_x^2 C_0 + \omega^2 C_0 C_x (C_0 + C_x)}{G_x^2 + \omega^2 (C_0 + C_x)^2}. \qquad (3\text{-}13)$$

Уравнения (3-12) и (3-13) показывают, что как активная, так и реактивная составляющие полного сопротивления эквивалентной параллельной цепи являются функциями проводимости датчика G_x. Рассмотренная схема, следовательно, при измерении любого из параметров цепи не может исключить влияния проводимости G_x на результаты измерения.

Выходной величиной датчика является его полная проводимость или одна из ее составляющих — активная или реактивная.

Рассмотрим, какой эффект дает включение последовательной емкости при измерении полного сопротивления датчика. В первую очередь изменяется угол диэлектрических потерь цепи. Тангенс угла диэлектрических потерь датчика равен:

$$\operatorname{tg}\delta_x = \frac{G_x}{\omega C_x}. \qquad (3\text{-}14)$$

Тангенс угла потерь эквивалентной цепи

$$\operatorname{tg}\delta_э = \frac{G_э}{B_э}.$$

После подстановки значений $G_э$ и $B_э$ из уравнения (3-11) и необходимых преобразований получаем:

$$\operatorname{tg}\delta_э = \frac{G_x \omega C_0}{G_x^2 + \omega^2 C_x (C_0 + C_x)}. \qquad (3\text{-}15)$$

Используя (3-14) и (3-15), подсчитаем отношение тангенсов углов потерь:

$$\frac{\operatorname{tg}\delta_э}{\operatorname{tg}\delta_x} = \frac{1}{1 + \frac{C_x}{C_0} + \frac{C_x}{C_0}\operatorname{tg}^2\delta_x}. \qquad (3\text{-}16)$$

Из (3-16) следует, что для любых значений C_x/C_0 отношение $\operatorname{tg}\delta_э/\operatorname{tg}\delta_x < 1$. Следовательно, цепь с последовательной емкостью имеет всегда меньший угол диэлектрических потерь, чем конденсаторный датчик, входящий в эту цепь.

Графики зависимости $\operatorname{tg}\delta_э/\operatorname{tg}\delta_x(C_x/C_0)$ (рис. 3-3,*а*) для различных значений $\operatorname{tg}\delta_x$ представляют собой семейство гипербол, имеющих общую точку (при $C_x/C_0=0$ и $\operatorname{tg}\delta_э/\operatorname{tg}\delta_x=1$) с асимптотой — осью C_x/C_0 ($\operatorname{tg}\delta_э/\operatorname{tg}\delta_x=0$ при $C_x/C_0 \longrightarrow +\infty$).

Увеличение $\operatorname{tg}\delta_x$ влечет за собой уменьшение тангенса угла потерь эквивалентной цепи $\operatorname{tg}\delta_э$. Значительное уменьшение $\operatorname{tg}\delta_э$ достигается уже при $C_x/C_0=1$. Увеличение отношения C_x/C_0 сверх 1,5—2 мало изменяет $\operatorname{tg}\delta_э$; кроме того, такое увеличение сопряжено со значительным уменьшением чувствительности измерения.

Уменьшение чувствительности можно приближенно характеризовать отношением модулей полных сопротив-

лений $|Z_0|/|Z_x|$: чем больше это отношение, тем ниже чувствительность.

Зависимость отношения модулей

$$\frac{|Z_0|}{|Z_x|}=\frac{C_x}{C_0}\sqrt{1+\mathrm{tg}^2\,\delta_x}$$

от отношения емкостей C_x/C_0 изображена графически на рис. 3-3,*б*; значения $\mathrm{tg}\,\delta_x=0{,}1$ и $\mathrm{tg}\,\delta_x=1$ те же, что и на графиках рис. 3-3,*а*. Отношение модулей $|Z_0|/|Z_x|$ изменяется линейно с C_x/C_0. При малых $\mathrm{tg}\,\delta_x$ коэффициент пропорциональности близок к 1. При наличии больших потерь в материале (кривые $\mathrm{tg}\,\delta_x=1$ на рис. 3-3,*а* и *б*)

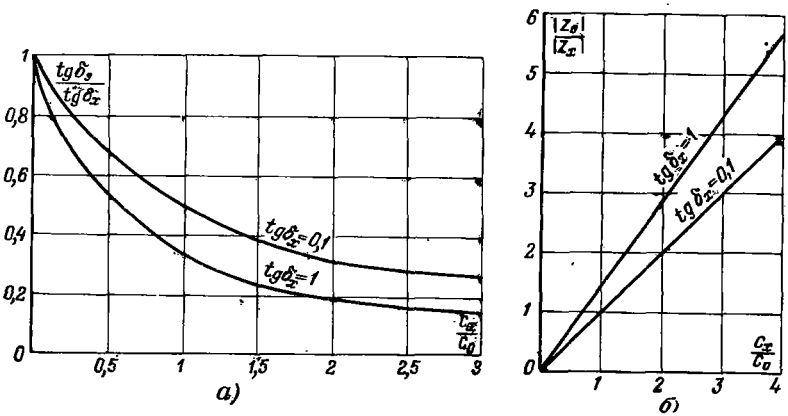


Рис. 3-3. Зависимости от отношения C_x/C_0 емкостей датчика и последовательного конденсатора.

а — отношения тангенсов углов потерь $\mathrm{tg}\,\delta_э/\mathrm{tg}\,\delta_x$; *б* — отношения модулей полных сопротивлений $|Z_0|/|Z_x|$.

включение последовательной емкости вызывает относительно большее уменьшение результирующего $\mathrm{tg}\,\delta$ цепи, чем при малых потерях; однако оно сопровождается и большей потерей чувствительности.

Зная параметры датчика (C_x и $\mathrm{tg}\,\delta_x$), можно на основании графиков на рис. 3-3 подобрать оптимальную величину C_0, обеспечивающую значительное уменьшение измеряемого угла потерь при допустимом снижении чувствительности.

Значительно реже емкостных применяются индуктивные датчики, представляющие собой катушку ин-

дуктивности, в электромагнитном поле которой находится исследуемый материал.

Индуктивные датчики могут иметь различные конструктивные формы, например цилиндрической катушки, витки которой намотаны на внешнюю поверхность трубки из твердого диэлектрика. Исследуемый материал заполняет внутреннюю полость или внешнее пространство трубки либо непрерывно протекает через нее.

Одной из распространенных форм индуктивного датчика является плоская спиральная многовитковая катушка, закрепленная на одной плоскости диска из твердого диэлектрика или запрессованная в такой диск. При измерениях поверхность изоляционной оболочки соприкасается с поверхностью исследуемого материала.

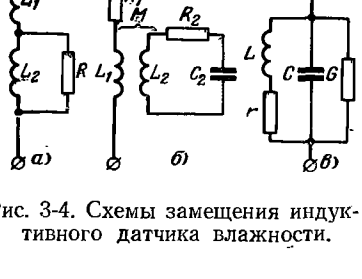


Рис. 3-4. Схемы замещения индуктивного датчика влажности.

Можно предложить различные схемы замещения индуктивного датчика. Показанная на рис. 3-4,*а* схема аналогична схеме замещения безэлектродного емкостного датчика; вместо емкостей в нее входят индуктивности. Индуктивность L_1 — это индуктивность самой катушки, а сопротивление R соответствует потерям в исследуемом материале. Недостатком приведенной схемы замещения является то обстоятельство, что она не учитывает собственной емкости катушки и ее изменений с влажностью материала. Эта схема, следовательно, лучше всего применима к материалам с высокой проводимостью при измерениях на относительно низких частотах. Схема замещения катушки в воздухе должна содержать собственную емкость, а также сопротивление потерь, соответствующее сумме потерь в катушке. Собственная резонансная частота катушки определяется всеми тремя составляющими ее полного сопротивления. Влияние емкостной и активной составляющих различно на разных частотах.

В измерительных схемах влагомеров, работающих при частотах не выше 10^7—$0{,}5 \cdot 10^8$ *гц*, индуктивный датчик представляет собой цепь с сосредоточенными параметрами L, C, R. Можно допустить, что параметр I не

изменяется при замене воздуха влажным материалом; однако параметры C и R сильно изменяются в зависимости от ε и γ материала; именно эти изменения используются для измерения влажности. В связи с этим можно предложить схему замещения (рис. 3-4,*б*), в которой L_1 и R_1 характеризуют индуктивность и проводимость датчика без материала, а параметры вторичного контура R_2 и C_2 — диэлектрические потери в материале и емкость датчика с материалом. Взаимная индуктивность M соответствует связи между катушкой и материалом.

Если связь индуктивного датчика с исследуемым материалом постоянна, можно применить простую схему замещения, аналогичную параллельной схеме емкостного датчика. В этой схеме (рис. 3-4,*в*) L обозначает индуктивность катушки, r — ее сопротивление, C — собственную емкость катушки с материалом, G — активную проводимость, соответствующую диэлектрическим потерям в датчике с материалом.

Из рассмотренных схем замещения вытекает, что выходная величина индуктивного датчика является функцией его емкости и активной проводимости, а следовательно, и обоих удельных параметров материала ε и $\operatorname{tg}\delta$. Характеристики влагомеров с индуктивным датчиком весьма близки к характеристикам влагомера с емкостным датчиком. Для датчиков обоих типов применяются одинаковые измерительные схемы. В некоторых случаях (например, при измерениях влажности движущихся материалов) индуктивный датчик позволяет получить более удобное конструктивное решение, чем емкостный.

3-2. ПОДАВЛЕНИЕ ВОЗМУЩАЮЩИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ В ДАТЧИКАХ ВЛАГОМЕРОВ

Способы минимизации влияния помех, рассматриваемые в настоящем параграфе, относятся к влагомерам не только электрическим, но и других типов Задача наилучшего выделения полезного сигнала на фоне шумов в части, касающейся датчика влагомера, сводится к подавлению возмущений $\bar{z}$ и $\bar{u}$. По способу оценки вносимой погрешности влияющие воздействия целесообразно разделить на:

а) «неучитываемые» (колебания химического состава, распределения влаги и т. п.), определение которых в процессе измерения влажности нецелесообразно из-за малости вносимой погрешности или слишком сложно. Влияние некоторых факторов можно ограничить на стадии предварительного проектирования;

б) «учитываемые», влияние которых принимается во внимание при измерениях влажности и компенсируется в измерительном устройстве или в датчике.

При компенсации в измерительном устройстве датчик должен лишь вводить в него информацию о действительном значении возмущающего воздействия. Для этого применяются встроенные в датчик измерительные преобразователи. При компенсации в датчике необходимы активные воздействия на объект измерения, которые либо служат для устранения самой причины возникновения возмущения (устройства для очистки электродов, фильтры), либо стабилизируют влияющий фактор (например, давление газа или плотность сыпучего материала) на определенном уровне.

Количественную оценку эффективности компенсации возмущающих воздействий в самом датчике дает воспроизводимость процесса преобразования в нем, которую можно оценить среднеквадратичной погрешностью ряда измерений, выполненных на одном и том же образце при наличии только компенсируемых возмущений.

Из неучитываемых факторов одним из важнейших является неравномерность распределения влаги в материале. Как правило, влажность в пределах большого объема твердого материала неравномерна и колеблется в некоторых пределах. Объем образца, вводимого в датчик, должен быть возможно большим, чтобы лучше выражать средние свойства материала. При измерениях влажности проточными или погружными датчиками (без отбора пробы) предпочтение следует отдавать способам измерения, дающим интегральную (усредненную) оценку влажности всего контролируемого объема материала. Возможность такой интегральной оценки, а также значительного увеличения объема исследуемого образца относится к преимуществам физических методов по сравнению с химико-аналитическими.

Из указанных соображений в датчиках диэлькометрических влагомеров следует стремиться к максимальной равномерности электрического поля в междуэлектродном пространстве.

Изолирующие детали должны изготовляться из негигроскопических диэлектриков, а сопротивление изоляции датчика должно значительно превосходить максимальное сопротивление материала между электродами. Особенно опасно, например, в кондуктометрических влагомерах повышение поверхностной проводимости изоляции, вызванное пленкой влаги или загрязнением контролируемым материалом.

При измерениях влажности материалов, обладающих повышенной адгезией, налипание материала, особенно на электродах влагомеров непрерывного действия, может стать основным возмущающим фактором. Для устранения налипания применяют ряд способов. Простейшими являются вертикальное расположение деталей, соприкасающихся с объектом измерения, и выбор материалов для их изготовления. Можно рекомендовать применение гидрофобных диэлектриков, например некоторых фторопластов (тефлон); в датчиках диэлькометрических влагомеров из этого же материала изготовляются защитные покрытия электродов. Иногда предусматривают специальные устройства для периодической или непрерывной очистки электродов — механические (скребки, щетки), пневматические или гидравлические (промывка датчиков для жидкостей).

Наконец, в ряде случаев используется непрерывный нагрев электродов, так как повышение температуры их поверхности спо-

способствует устранению налипания; такой способ был применен во влагомере для бурого угля [Л. 3-3].

Из возмущающих факторов, информацию о которых получают в датчике, важнейшим является температура. Устранение температурной погрешности путем термостатирования датчика редко применяется во влагомерах. Температурная погрешность определяется погрешностью самого датчика и температурным коэффициентом измеряемой физической величины исследуемого материала; основное значение имеет вторая составляющая.

Температурная погрешность датчика без исследуемого материала обусловлена изменением геометрических размеров электродной системы и изменением свойств (в том числе и электрических) диэлектриков, используемых в этой системе. Для уменьшения ее можно применять металлы и диэлектрики с минимальными температурными коэффициентами линейного расширения; диэлектрики должны обладать минимальной зависимостью электрических параметров от температуры. Температурная погрешность резко уменьшается при применении дифференциальных датчиков.

На практике в большинстве случаев ограничиваются подбором материалов для электродов и других деталей датчика с учетом их температурных коэффициентов расширения для взаимной компенсации изменений размеров при изменениях температуры в определенных пределах.

Для измерения температуры контролируемого материала применяют известные методы и измерительные преобразователи.

В диэлькометрических влагомерах (особенно автоматических) нашло применение сочетание температурного преобразователя с электрическим емкостным преобразователем, осуществляемое различными способами.



Рис. 3-5. Емкостный преобразователь в виде ртутного термометра.

Предложенная автором конструкция преобразователя в виде ртутного стеклянного термометра схематически показана на рис. 3-5, на котором: *1* — резервуар с ртутью; *2* — капиллярная трубка; *3* — электрод на внешней поверхности капилляра (металлический слой, нанесенный распылением на трубку *2*); *4* — вывод от электрода *3*; *5* — платиновая проволочка, впаянная в капилляр (в точке, расположенной ниже минимального уровня ртути); *6* — внешняя защитная стеклянная трубка. Обкладками конденсатора служат столбик ртути и электрод *3*, диэлектриком — стенка стеклянной капиллярной трубки. Емкость, измеряемая между выводами *5* и *4*, линейно возрастает с ростом температуры.

В другом конструктивном исполнении конденсаторный преобразователь имеет два наружных кольцевых электрода, охватывающих внешнюю поверхность термометра; перемещение ртутного столбика изменяет емкость между электродами.

Способ температурной компенсации, пригодный для высокочастотных влагомеров, основан на применении в колебательном контуре, содержащем датчики влажности, конденсаторов постоянной емкости с большим отрицательным температурным коэффициентом емкости.

Недостатками описанных емкостных термокомпенсаторов являются:

а) невозможность или сложность изменения величины температурной поправки. Необходимость в таком изменении может возникнуть при применении влагомера к различным материалам;

б) тепловая инерционность, вызывающая у автоматических влагомеров дополнительную динамическую погрешность.

Первый недостаток можно устранить, если в измерительное устройство вводится выходной сигнал не самого термодатчика, а его измерительной цепи (например, мостовой схемы, в которую включено термосопротивление). Для уменьшения динамической погрешности следует применять малоинерционные температурные преобразователи.

Информацию о других параметрах материала (кроме температуры) от датчиков влажности получают редко.

Перейдем к рассмотренню способов подавления возмущений активным воздействием на материал. Наиболее распространенными способами являются:

1. Измельчение образца сыпучего материала, освобождающее от погрешностей, связанных с гранулометрическим составом и состоянием поверхности частиц; достигается также значительное уменьшение погрешностей от неоднородности влажности материала. Измельчение образца чаще всего применяют в кондуктометрических влагомерах. Следует отметить, что для ряда материалов (дубовая кора, некоторые зерновые культуры) при использовании образцов, измельченных и уплотненных относительно высокими давлениями (0,6—0,7 *кгс/см*^{2} и выше), были получены градуировочные зависимости, совпадающие с градуировочной характеристикой для неизмельченных образцов (при той же величине давления).

Для размола зерна до введения в датчик часто применяют лабораторные мельнички; опыт показал, что лучшими являются мельнички с приводом от электродвигателя, дающие тонкое и равномерное измельчение образца за короткий промежуток времени. При применении отдельного измельчающего устройства часть влаги образца теряется до его введения в датчик. Убыль влаги в мельничке указанного выше типа сравнительно невелика и учитывается при градуировке влагомера, но потери влаги при переносе измельченного образца из мельнички в датчик могут достигнуть больших величин (особенно при работе с зерном повышенной влажности). Они зависят от параметров (температура, влажность и скорость движения) окружающего воздуха и промежутка времени между размолом и измерением. Эти факторы могут служить источником неустранимых погрешностей.

Для устранения указанных недостатков, сокращения длительности и упрощения измерений в некоторых влагомерах размол образца зерна происходит непосредственно в датчике, что влечет за собой усложнение его конструкции.

2. Стабилизация плотности материала в воспринимающем элементе датчика. Плотность материала оказывает сильное влияние почти на все физические параметры, используемые для измерений влажности твердых тел и жидкостей. Для компенсации погрешности от плотности при измерениях влажности дисперсных материалов — сыпучих, рыхлых малосвязных, легко деформируемых волокнистых и т. п. — применяют принудительное уплотнение исследуемого образца.

Уплотнение сыпучего материала в междуэлектродном пространстве уменьшает влияние не только размеров частиц, но и состояния их поверхности, уменьшает и делает более постоянными контактные сопротивления между отдельными частицами материала и между электродами и материалом. Значение перечисленных факторов особенно велико при измерении влажности сыпучих материалов кондуктометрическими влагомерами.

При сжатии сыпучих материалов их проводимость увеличивается вначале достаточно резко; с повышением давления рост проводимости замедляется и, начиная с некоторой величины давления, изменения давления почти не влияют на величину сопротивления. Для уменьшения влияния колебаний степени уплотнения на результаты измерений приходится применять достаточно высокие давления, соответствующие области насыщения зависимости удельного сопротивления от плотности материала. В этом заключается основной недостаток датчиков с уплотнением: большие усилия деформируют образец и в ряде случаев (например, при измерении влажности зерна) частично его разрушают. Вместо материала в естественном его состоянии объектом измерения становится искусственно спрессованный брикет из этого материала. Электрическое сопротивление такого брикета зависит и от механических свойств материала, таких как твердость, стекловидность зерна и т. п. При прессовании образцов высокой влажности возможен частичный отжим влаги с ее выделением на электродах. Кроме того, большие усилия приводят к повышенному износу датчика. Деформация или разрушение образца материала при измерении влажности исключают возможность повторного измерения, что также является эксплуатационным недостатком.

Если измерения проводятся при повышенной частоте, контактное сопротивление электрод — материал имеет меньшее значение, а значительное повышение проводимости материала между электродами усложняет измерение. Поэтому в датчиках диэлькометрических влагомеров величины удельных нагрузок, как правило, меньше, чем в кондуктометрических, и материал не подвергается большим деформациям. Конструктивное выполнение устройств для измельчения или уплотнения материала рассматривается ниже при описании конструкций датчиков.

3. Эмульгирование пробы, применяемое в неавтоматических электровлагомерах для эмульсий, в первую очередь нефтей, для перевода всей воды в устойчивое диспергированное состояние и предотвращения расслоения эмульсии. Эмульгаторами служат обычно механические устройства — мешалки, насосы, входящие в состав пробоподготовительного устройства влагомера.

Значительно меньшее применение нашли другие способы изменения состава или строения исследуемого образца перед измерением влажности с целью улучшения физических параметров, используемых для этого измерения. Для уменьшения диэлектрических потерь в датчике можно смешивать сыпучие материалы (в определенном массовом отношении) с «растворителем» — дисперсным материалом с малыми ε и $\operatorname{tg}\delta$, например сухим песком. При этом одновременно устраняется влияние поверхностной влаги, но уменьшается чувствительность. Для измерения очень больших влагосодержаний нефтей также применялось смешивание исследуемого продукта с обезвоженной нефтью.

Увеличение удельного сопротивления сливок [Л. 3-4] достигалось переходом от эмульсии типа «жир в воде», в которой вода с рас-

творенными в ней солями образует непрерывную фазу, к эмульсии «вода в жире» с водой в виде прерывистой фазы. Для этого применялся датчик специальной конструкции, в котором сливки перед поступлением в междуэлектродное пространство подвергались интенсивному механическому воздействию при одиовременном охлаждении.

Другим способом, сильно влияющим на характеристики объекта измерения, может служить изменение его температуры. Для измерения диэлькометрическим методом низких влагосодержаний в области преобладания связанной влаги сухих молочных продуктов было предложено подогревать их до +60 °С [Л. 3-5]. Диэлькометрические измерения влажности материалов с большой сквозной проводимостью, например пищевых продуктов с высокой влажностью, облегчаются путем перевода свободной влаги в твердую фазу, влекущего за собой повышение удельного сопротивления материала. Для дискретных измерений с использованием этого способа была предложена конструкция емкостного датчика с термоэлектрическим холодильником.

Для изменения характеристик объекта можно использовать и другие виды воздействий: упругие колебания, наложение электрического поля различной частоты и напряженности. Перечисленные способы усложняют конструкцию датчиков влажности и процесс измерения; в связи с этим они не нашли широкого применения.

Более распространен метод сравнения, в котором один датчик («измерительный») измеряет влажность контролируемого материала, а второй («эталонный») содержит этот же материал, но с постоянной влажностью (чаще всего равной нулю). Измерительный и эталонный преобразователи конструктивно могут быть объединены в одном датчике. Измерительное устройство сравнивает выходные сигналы обоих преобразователей; так как все свойства материала, кроме влажности, одинаковы, результат измерения является функцией одной лишь влажности. Этот способ может обеспечить одновременную компенсацию нескольких возмущающих величин — температуры, плотности, химического состава, сорта и других свойств материала. Он нашел применение в некоторых гигрометрах, а также в лабораторных и автоматических влагомерах для жидкостей — нефтей и нефтепродуктов. В последних применяются различные физико-механические и физико-химические способы получения обезвоженного «внутреннего эталона».

В автоматических влагомерах непрерывного действия инерционность этой операции является серьезным недостатком, вызывая большие динамические погрешности влагомера. Громоздкость и большая длительность получения абсолютно сухого образца еще в большей степени сказываются при измерениях влажности твердых материалов, где добавляются затруднения, связанные с сохранением неизменным этого образца.

В некоторых датчиках предусмотрена возможность изменения постоянной электродов в процессе эксплуатации.

Перенастройка датчика осуществляется изменением его геометрических параметров, чаще всего расстояния между электродами. Она используется не только для обеспечения взаимозаменяемости датчиков при их серийном выпуске, но и для улучшения характеристик влагомера (повышение чувствительности датчика, настройка на определенный сорт материала) при работе с различными материалами.

3-3. КОНСТРУКТИВНЫЕ ИСПОЛНЕНИЯ ДАТЧИКОВ

Конструкция датчика определяется главным образом свойствами материала, для которого датчик предназначен: агрегатным состоянием, внешним строением, а также условиями работы (ручная или автоматическая загрузка и выгрузка материала, проточные или погружные датчики).

1. Датчики для жидкостей имеют наиболее простую конструкцию, так как в них без дополнительных приспособлений обеспечивается однородное заполнение междуэлектродного пространства. На практике нашли применение датчики цилиндрические, плоские и с внешним полем (только в диэлькометрических влагомерах): Цилиндрические датчики, состоящие из металлического корпуса, который служит наружным электродом, и коаксиального внутреннего цилиндрического электрода, отличаются простотой конструкции и удобством сопряжения с трубопроводом.

Оценка погрешностей цилиндрических датчиков, вызванных изменениями размеров или взаимного расположения электродов, показывает возможность построения серии датчиков с малым разбросом электрических параметров при относительно невысокой точности изготовления [Л. 3-6].

Плоские многопластинчатые датчики имеют несколько металлических параллельных пластин, скрепленных с помощью изоляторов. Увеличивая число и площадь пластин и уменьшая зазор между ними, можно увеличить рабочую емкость и чувствительность датчика, например, для измерения низких влагосодержаний. Однако величина минимального зазора ограничена (это относится и к цилиндрическим датчикам) градиентом электрического поля, а также размерами дисперсных частиц; ширина зазора должна превышать эти размеры не менее чем на два порядка. Кроме того, в плоских датчиках сложнее осуществить защитные покрытия электродов; в них возрастают утечки тока по поверхности изоляционных деталей, а при высокой влажности контролируемой жидкости возможно накопление воды в зазорах между электродами. Последнее обстоятельство препятствует применению многопластинчатых датчиков для измерения высоких влагосодержаний. Их можно применить для некоторых вязких и пастообразных материалов; в этом

случае число пластин обычно сокращают, а зазор между ними увеличивают. В автоматическом влагомере для сливочного масла [Л. 3-7] емкостный проточный датчик состоит из трех плоских алюминиевых пластин; две наружные заземлены, а средняя омывается потоком масла.

Датчики с внешними электродами выполняются чаще всего в виде сосуда (в проточных датчиках — отрезка трубы) из твердого диэлектрика, на внешней поверхности которого имеются электроды, большей частью кольцевые.

К недостаткам этих датчиков относится невозможность получения равномерного поля в пространстве между электродами. Выбором геометрических размеров датчика можно получить желаемое (оптимальное с точки зрения чувствительности) соотношение между его выходными параметрами — высокочастотной проводимостью и эквивалентной емкостью; методика такого расчета приведена в [Л. 3-8].

2. Датчики для сыпучих материалов. К ним относятся многочисленные дисперсные насыпные материалы; в зависимости от максимального размера (крупности) частиц их можно разделить на порошкообразные, зернистые и кусковые.

Для этих материалов разработано много конструкций датчиков:

а) с произвольной засыпкой сыпучего материала;

б) с самоуплотнением материала;

в) с принудительным уплотнением материала в междуэлектродном пространстве.

Основным недостатком датчиков первой группы является различная степень уплотнения материала между электродами, сильно влияющая на электрические характеристики материала. Скорость и высота падения материала при его введении в датчик, случайные сотрясения и удары по датчику меняют уплотнение. Электрическое сопротивление материала при низкой влажности (до 12—13%) весьма велико, что несколько усложняет измерение кондуктометрическим методом. Еще важнее то обстоятельство, что при измерении сопротивления зернистых и кусковых материалов результат измерения зависит от состояния поверхности отдельных зерен или кусков (например, от ее шероховатости, запыленности). Также сильно влияет на результаты измерения гранулометрический состав материала. В таких датчиках трудно полу-

чить постоянное сопротивление контакта материала с электродами.

Перечисленные факторы вызывают большие погрешности измерения, и датчики без уплотнения материала находят применение лишь в автоматических влагомерах, где постоянство уплотнения создается самим потоком материала. Для получения постоянного заполнения датчика его выходное сечение делают меньше входного; иногда для регулирования расхода материала через датчик перед его выходным отверстием предусматривают выходную заслонку. Такой принцип используется в датчиках различной конструкции — с плоскими пластинчатыми и цилиндрическими коаксиальными электродами. Эти датчики отличаются простотой конструкции; однако в них не обеспечено одинаковое уплотнение материала в междуэлектродном пространстве и не устранена возможность забивания материалом.

Воспроизводимость датчиков со свободной засыпкой можно улучшить надлежащим выбором геометрических размеров, их согласованием с размерами частиц материала. В [Л. 3-9] на основании экспериментального исследования рекомендуются следующие соотношения размеров цилиндрического коаксиального проточного датчика для сыпучих материалов:

$$d \geqslant 5a;\ 0{,}5(D-d) \geqslant 10a;\ H \geqslant 10a,$$

где D и d — диаметры электродов — внутренний наружного и внешний внутреннего; H — высота электродов; a — максимальный размер частиц материала.

Выпускное отверстие рекомендуется делать круглого сечения с диаметром, равным $10a$; угол выходного конуса должен быть на 15—20° больше угла естественного откоса исследуемого материала.

Датчики с самоуплотнением нашли применение в диэлькометрических влагомерах для зернистых материалов. В таких датчиках междуэлектродное пространство заполняется образцом материала, падающим с определенной высоты под влиянием собственного веса.

Конструкция датчика этого типа показана на рис. 3-6,*а*, где *1* — бункер прямоугольного сечения для исследуемого образца; *2* — плоские прямоугольные металлические пластины конденсатора, переходящие в пластины *3* из изоляционного материала; *4* — поворотная заслонка, имеющая механизм с защелкой, который обеспечивает ее мгновенное открытие и падение образца в конденсатор с постоянной

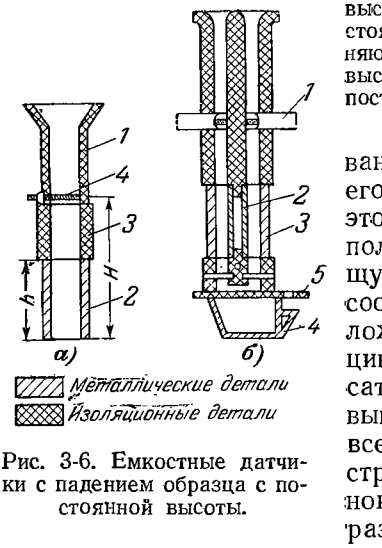


Рис. 3-6. Емкостные датчики с падением образца с постоянной высоты.

высоты H. Датчик рассчитан на постоянную навеску материала, заполняющую его на высоту, меньшую, чем высота пластин *2*, что обеспечивает постоянство краевой емкости.

Необходимость во взвешивании образца отпадает при его дозировке по объему. При этом конденсатор следует заполнять на высоту, превышающую размер h пластин. Целесообразно использовать предложенную автором конструкцию цилиндрического конденсатора (рис. 3-6,*б*) с одинаковым кольцевым зазором по всей высоте датчика. При быстром открытии обеих половинок заслонки *1* с защелкой образец материала заполняет внутреннюю полость датчика на высоту, превышающую на 25% высоту обкладок *2* и *3*. Для опорожнения датчика в выдвижной ящик *4* выдвигают задвижку *5*. В рассмотренных конструкциях заслонки должны открываться мгновенно, что обеспечивает некоторый автоматизм заполнения конденсатора.

Экспериментальные исследования автора и последующий статистический анализ показали, что для зерна хлебных злаков датчики по рис. 3-6,*а* и *б* обеспечивают лучшую воспроизводимость показаний, чем датчик с произвольной засыпкой или принудительным уплотнением образца. При прочих равных условиях большая точность измерения влажности достигается при весовой дозировке образца (постоянство навески); объемная дозировка несколько увеличивает погрешность измерения.

Рассмотрим теперь наиболее характерные конструкции кондуктометрических датчиков с уплотнением.

Г. Б. Пузрин еще в начале 30-х годов предложил конструкцию датчика для зерна, в котором постоянная навеска зерна подвергается сжатию в постоянном объеме с помощью ручного пресса. Этот принцип нашел ряд конструктивных воплощений; в частности, он был использован во влагомерах ВП-4 и ВЭ-2 (рис. 3-7), широко распространенных в хлебозаготовительной системе.

Навеска зерна *1* (для пшеницы, ржи, ячменя — 8 *г*, для овса — 7 *г*) насыпается в металлический стакан *2*. Одним из электродов служит кольцо *3*, изолированное от стакана с помощью прокладок *4*. Второй, центральный электрод *5* соединен с корпусом датчика; конструкция электродов рассчитана на уменьшение влияния сопротивления торцовых частей брикета зерна. Пуансон *6* служит для уплотнения образца; давление на пуансон создает ручной винтовой пресс, снабженный визирным устройством, указывающим предел вращения зажимного винта при каждом прессовании образца. Это устройство должно обеспечить постоянство давления на образец при определениях влажности. Стакан *2* заключен в футляр *7* из диэлектрика. У этого датчика необходимо часто проверять правильность установки визирного устройства с помощью контрольного цилиндра, вставляемого в датчик; в случае необходимости положение визирного устройства корректируется.

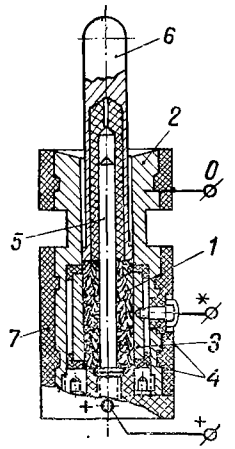


Рис. 3-7. Датчик для зерна с прессованием образца.

В других датчиках (кондуктометрические влагомеры английской фирмы «Маркони» для измельченных порошкообразных материалов и др.) электродное устройство имеет два металлических концентрических электрода в форме мелкой чашечки и охватывающего ее кольца. Рабочие поверхности электродов расположены в одной плоскости. Благодаря этому взвешивания пробы материала не требуется; достаточно, чтобы объем образца был не меньше определенной величины. Образец испытывается при постоянном давлении (около 0,7 *кгс/см*^{2}), создаваемом ручным винтовым прессом.

Значительно реже, например в диэлькометрическом влагомере для торфа, для уплотнения образца материала используется гидравлический пресс.

Перейдем к рассмотрению конструкций с размолом образца зерна непосредственно в датчике.

Датчик, применяемый в распространенном в США влагомере TAG для зерна, уплотняет сыпучий материал в узком зазоре между двумя вращающимися металлическими валиками с рифленой цилиндрической поверхностью. Общий вид датчика показан на рис. 3-8.

Электродвигатель вращает через редуктор (электродвигатель и редуктор не показаны на рисунке) со скоростью 32 *об/мин* валик *1*, который электрически соединен со станиной датчика. Второй валик *2* изолирован от корпуса стойками *3* из электроизоляционного материа-

ла. Валик *2* снабжен пружинящим трущимся контактом и ручкой *4* для поворачивания вручную. Сцепление между валиками осуществляется через слой материала; последний поступает в зазор между валиками из засыпного бункера *5*. Валики *1* и *2* выполняют роль электродов; сопротивление слоя сыпучего материала измеряется во время вращения валиков. Длина валиков 105 *мм*; величины зазора между ними регулируются с помощью сменных прокладок *6* в зависимости от того, какая зерновая культура исследуется. При равенстве скоростей обоих валиков измеряется сопротивление слоя зерна, уплотненного в зазоре по образующей обоих цилиндров. Под валиками установлены два скребка *7* из пластмассы; скребки прижимаются пружиной *8* к поверхности валиков и очищают ее при вращении электродов. Весь датчик смонтирован на станине *9* из чугунного литья, имеющей два винта для закрепления на столе.

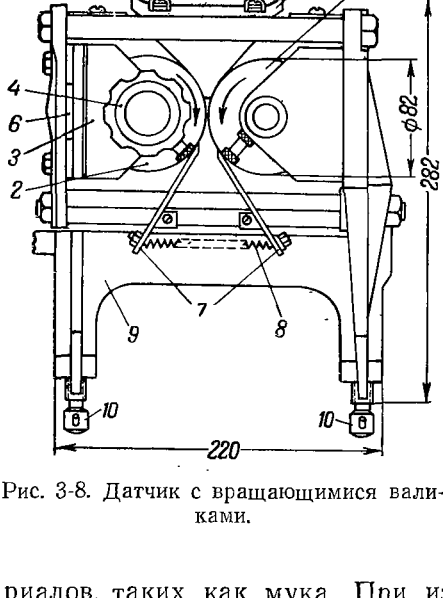


Рис. 3-8. Датчик с вращающимися валиками.

Датчик с валиками отличается громоздкостью и большой массой; он неприменим для тонко измельченных материалов, таких как мука. При измерении зерна с повышенной влажностью оно налипает на поверхность валика *2* и измерение становится невозможным. В то же время при применении этого датчика результаты измерения не зависят от величины навески; можно использовать большие навески (100—150 *г* и больше), значительно лучше отражающие среднюю влажность материала, чем малые навески, используемые в датчике с ручным прессом. Здесь, так же как и в других датчиках с прессованием материала, на результаты измерения влияет износ электродов, происходящий вследствие больших усилий при прессовании.

Предварительный размол зерна и его уплотнение осуществляются иногда с помощью миниатюрных ручных размалывающих устройств, встроенных непосредственно в датчик (см. [Л. 3-10]).

В диэлькометрических влагомерах, как уже указывалось, сыпучие материалы уплотняются в меньшей степени, чем в кондуктометрических. Для порошкообразных материалов, например для муки и других измельченных продуктов переработки зерна, лучшим по воспроизводимости результатов измерения является датчик с принудительным уплотнением постоянной навески в постоянном объеме. Различные конструкции таких емкостных датчиков показаны на рис. 3-9. В датчике рис. 3-9,*а* образец уплотняется внутри плоских параллельных пластин *1* с помощью вкладыша *2* из твердого диэлектрика; при измерении вкладыш закрепляется на крышке датчика с помощью подпружиненных фиксаторов.

В датчике на рис. 3-9,*б* образец материала *1* вводится в цилиндр *2* из изоляционного материала. Электродами служат дно цилиндра *3* и поршень *4*, нагруженный калиброванной пружиной *5*, которая упирается в крышку *6*, закрепляемую на цилиндре затвором *7*.

Датчик, применявшийся для измерения влажности пылевидного угольного топлива (угольной пыли рис. 3-9,*в*), [Л. 3-11], имеет коаксиальные латунные электроды *1* и основание *2* из органического стекла. Верхняя крышка *3* закрывает датчик при помощи байонетного затвора *4* и уплотняет постоянную навеску материала.

Уплотнение постоянной массы материала в постоянном объеме затруднительно, если изменениям влажности образца сопутствует значительное изменение плотности материала. Поэтому находит применение уплотнение также с помощью грузов постоянной величины и специальных вибрационных устройств. Первый способ применял-

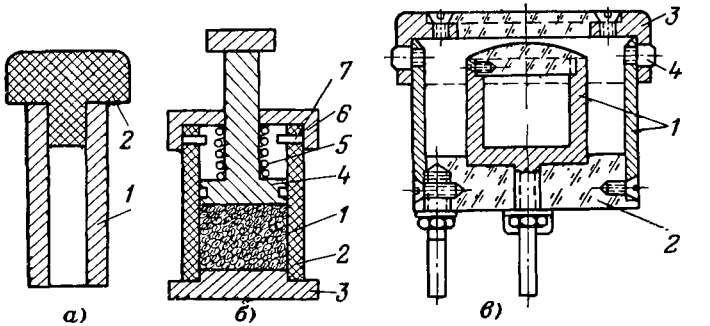


Рис. 3-9. Емкостные датчики с принудительным уплотнением с помощью вкладыша (*а*), поршня (*б*) и крышки (*в*).

ся, например, в датчике кондуктометрического влагомера для древесной стружки, конструкция которого аналогична показанной на рис. 3-9,*б;* в нем уплотняющее усилие создает груз, воздействующий на поршень [Л. 3-12].

Датчик с вибрационным уплотнением, предложенный С. Д. Звягиным (рис. 3-10), состоит из цилиндрического стакана *1,* являющегося внешним электродом, и внутреннего цилиндрического электрода *2,* закрепленного в стакане с помощью шпилек *3* с изоляционными втулками *4.*

В нижней части датчика находится электромагнитный вибратор, электромагнит которого (сердечник *5* с катушкой *6*) имеет якорь *7,* соединенный через тягу *8* с мембраной *9* (толщиной 0,1—0,2 *мм*). Мембрана является дном верхней части датчика, в которую засыпается исследуемый образец. При включении катушки электромагнита в сеть переменного тока частотой 50 *гц* мембрана вибрирует и ее колебания передаются материалу в междуэлектродном пространстве.

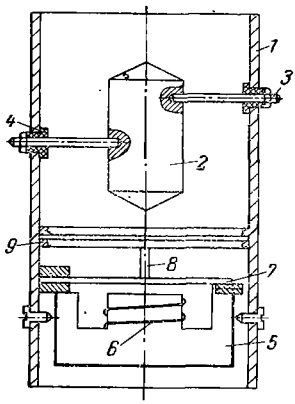


Рис. 3-10. Датчик с вибрационным устройством.

В цилиндрическом датчике для литейных формовочных смесей [Л. 3-13] применен магнитострикционный вибратор, стержень которого одновременно служит внутренним электродом; в другой модификации трубка вибратора используется в качестве внешнего электрода.

В некоторых из рассмотренных конструкций датчиков можно отказаться от взвешивания образца. Это возможно в описанных датчиках с электродами в одной плоскости, а также с коаксиальными цилиндрическими электродами, у которых высота внутреннего электрода меньше высоты наружного электрода, а полость между ними полностью заполняется материалом. В нижней, активной части датчика материал имеет примерно одинаковое уплотнение даже при некоторых колебаниях объема образца. Такой способ применим при различных методах уплотнения (прессом, грузом и т. д.), но обеспечивает

воспроизводимость, несколько худшую, чем при постоянстве навески.

В датчиках автоматических электровлагомеров, контролирующих поток сыпучих материалов, используются некоторые из рассмотренных способов уплотнения, а также питатели непрерывного или дискретного действия различных типов. Задачей питателей является не только уплотнение, но и загрузка и опорожнение датчика.

Простейшее решение заключается в использовании односторонних датчиков с внешним полем, установленных в стенке лотка, по которому перемещается сыпучий материал, под лентой транспортера или выполненных в виде «лыж» (одинарных или пар), скользящих по поверхности перемещаемого материала. Толщина слоя сыпучего может изменяться в широких пределах (начиная с определенного минимального значения), если при этом не изменяется плотность материала. Перед датчиком на конвейере обычно устанавливают ограничитель, стабилизирующий толщину слоя сыпучего и частично его плотность. Недостатком рассматриваемых датчиков при любом способе установки является контроль влажности только в слое, прилегающем к поверхности датчика. При установке датчика под лентой конвейера устраняется возможность налипания материала на рабочей поверхности датчика, но появляются дополнительные источники погрешностей — колебание толщины ленты и изменение ее электрических свойств.

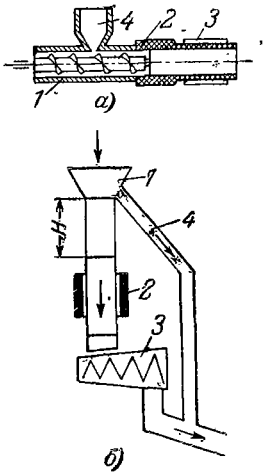


Рис. 3-11. Датчик для сыпучих материалов со шнековым питателем, установленным перед датчиком и после датчика.

Шнековые и тарельчатые питатели, используемые для различных материалов, в том числе тонко измельченных и порошкообразных, могут быть установлены перед датчиком и после него по ходу материала. В первом случае питатель стабилизирует расход материала через датчик.

Датчик для угольной шихты состоит из шнека *1* (рис. 3-11,*а*) и направляющей трубы *2* из винипласта,

имеющей диаметр, несколько больший, чем корпус шнека, и конусность около 1% для свободного прохождения шихты. Металлические электроды *3* установлены на внешней поверхности трубы и не соприкасаются с шихтой. Приемная воронка *4* имеет непрерывно движущееся устройство с ножом для рыхления шихты и стержнями, устраняющими ее зависание в воронке.

Для предотвращения забивания датчика материалом более рациональна установка питателя после датчика (рис. 3-11,*б*). Сыпучий материал проходит из бункера *1* по вертикальной трубе через проточный конденсатор с внешними электродами *2*, опорожняемый непрерывно работающим шнеком *3*. Производительность шнекового питателя устанавливается из такого расчета, чтобы конденсатор был всегда заполнен с некоторым избытком. Илишнее количество материала возвращается в общую транспортную систему через байпасную трубу *4*. В этом случае уплотнение материала в конденсаторе обусловлено давлением столба материала высотой *H*. Для устранения накопления сыпучего при выходе из конденсатора шнек выполняется с плавно увеличивающимся сечением в направлении транспортирования. Известно также применение вибраторов в сочетании с проточными цилиндрическими датчиками для порошкообразных материалов. Вибратор выполняет двоякую функцию: а) при закрытой выходной заслонке уплотняет материал; б) после открытия заслонки опорожняет датчик.

Последнюю категорию образуют датчики-зонды, предназначенные для введения в массу материала (зерно, грунт) и проведения разовых измерений или непрерывного контроля его влажности без отбора образца. Датчики этого типа имеют форму (ножевидную, копьевидную, с конусным наконечником и т. п.), облегчающую введение в материал. Датчики-зонды можно разделить на: а) датчики без уплотнения материала; б) датчики с приспособлениями для уплотнения материала.

Датчики первой группы вводят в сыпучий материал в тех местах, где масса материала, расположенная выше, создает постоянное (или близкое к постоянному) уплотнение. Наиболее простую конструкцию имеют датчики с одиночным электродом; часто применяют зонды и с двумя электродами.

Для песчаных грунтов в естественных условиях залегания Г. Я. Черняк [Л. 3-14] предложил датчик

(рис. 3-12,*а*), в котором электродами служат два полых металлических цилиндра *1* и *2*, расположенных на одной оси на некотором расстоянии друг от друга. Верхний электрод *2* заземляется, электрод *1* посредством провода *3* подключается к измерительному устройству. Электроды соединены механически с помощью изоляционной втулки *4*. Линии электрического поля в основном параллельны оси датчика и охватывают некоторое пространство вокруг него, которое в первом приближении имеет форму цилиндра, коаксиального с зондом.

Другая конструкция конденсаторного датчика-щупа («вилка») для сыпучих материалов показана на рис. 3-12,*б*. Обкладками являются два заостренных но-

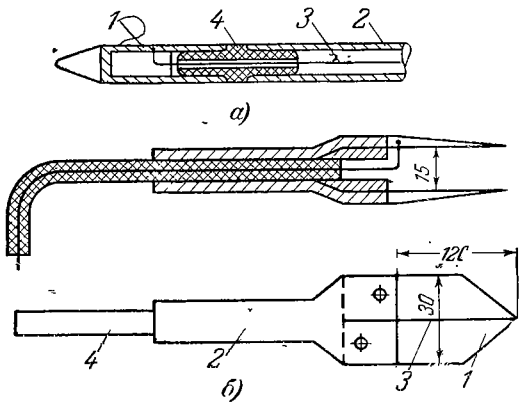


Рис. 3-12. Емкостные датчики-зонды.

жевых электрода *1*, смонтированных в рукоятке *2* из изоляционного материала и снабженных ребрами жесткости *3*. Через центральное отверстие рукоятки проходит гибкий коаксиальный кабель *4* для присоединения датчика к измерительному прибору.

В датчиках второй группы, предназначенных для измерения влажности материалов в мешках, тюках, насыпи и т. п., для уплотнения чаще всего используется калиброванная пружина. Специфической разновидностью зондов, применимой не только для сыпучих материалов, но и в строительных конструкциях, сооружениях различного рода и т. п., являются так называемые «закладные» датчики, вводимые в массу материала для длительного измерения влагосодержания. Датчики этого типа служат

для локальных измерений в определенном объеме материала; при условии миниатюризации они могут измерять поля влажности. Примером могут служить датчики, выполненные фотохимическим способом на фольгированном стеклотекстолите в виде плоского одностороннего конденсатора с электродами различной формы, например в виде спиралей, расположенных на одинаковом расстоянии друг от друга [Л. 3-15].

Погружные датчики-зонды применяются также в автоматических влагомерах для сыпучих материалов (а также жидкостей) в неподвижном состоянии или в потоке.

3. Датчики для мягких волокнистых материалов. К этой категории можно отнести легко деформирующиеся (прессующиеся) рыхлые материалы с малой плотностью. Большинство таких материалов имеет волокнистую структуру, как, например, хлопок-сырец, хлопковое волокно, льняное волокно, вата гигроскопическая, минеральная и стеклянная и т. п. Для материалов данной группы применимы датчики сыпучих материалов с принудительным уплотнением, а также датчики-зонды, описанные выше.

Во влагомерах для волокнистых материалов растительного происхождения, состоящих из отдельных тонких волокон, стеблей и листьев (колосья хлебных злаков, трава, сено, клевер и т. п.), применяют «цанговые» датчики в виде щипцов, на верхнем и нижнем концах которых укреплены изолированные от них электроды. Электроды выполняются плоскими или с выступами. Пучок волокон сжимают вручную между электродами до получения постоянного показания влагомера (обычно кондуктометрического).

При необходимости измерения влажности легко деформируемых материалов в потоке, например в виде хлопьев, чешуек или сплошной массы, можно получать однородный уплотненный слой материала с помощью вращающихся металлических валков. При перемещении на ленте конвейера достаточно одного валка; при свободном падении материала он уплотняется в зазоре между двумя валками, которые могут одновременно служить электродами кондуктометрического датчика.

4. Датчики для твердых связных материалов. Органические и неорганические влагосодержащие монолитные (сплошной массы) материалы могут иметь правильную геометрическую форму (блоки, бруски, пли-

ты) или форму тел, ограниченных нерегулярными поверхностями. Листовые материалы, имеющие форму слоёв малой толщины, являются одной из разновидностей этой категории материалов.

Для рассматриваемой группы материалов применяются датчики с электродами:

а) односторонними, контактирующими с одной поверхностью материала, а также изолированными от нее воздушным зазором или слоем тонкого диэлектрика; в последнем случае они применяются только в диэлькометрических влагомерах;

б) вводимыми в толщу материала.

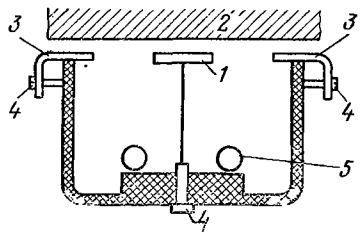


Рис. 3-13. Односторонний датчик с перемещаемыми электродами.

Форма поля одностороннего датчика и, следовательно, контролируемая им зона материала определяются формой и размерами электродов, в первую очередь расстояниями между электродами, а при измерениях на повышенной частоте также расстоянием между электродами и поверхностью материала. Поэтому представляет интерес конструкция датчика (рис. 3-13) [Л. 3-16], позволяющая изменять указанные расстояния. Центральный потенциальный электрод *1* можно перемещать перпендикулярно плоскости поверхности объекта измерения *2;* крайние заземленные электроды *3* можно сдвигать в плоскости, параллельной поверхности объекта. Перемещение всех электродов выполняется с помощью регулировочных винтов *4.* Трубки *5* имеют радиальные отверстия для очистки сжатым воздухом зазоров между электродами и изолирующих деталей датчика, что особенно полезно для автоматических влагомеров.

Металлические электроды односторонних датчиков могут иметь разную форму.

Весьма распространены датчики с металлическими электродами в виде параллельных прямоугольников с рабочими поверхностями, расположенными в одной плоскости. Электроды соединены электрически через один. Недостатком является влияние близости края образца на результат измерения.

Датчик для мягких кож кондуктометрического влагомера ЭВК [Л. 3-17] имеет электроды в виде металлических зубчатых гребенок, закрепленных на общем основании из твердого диэлектрика. Центральная призма с двумя гребенками представляет собой один электрод; две параллельные ей внешние гребенки образуют второй электрод. Надежный контакт с кожей обеспечивается весом датчика (около 5,5 *кг*). Автор применял также датчик аналогичной конструкции с зубчатыми гребенками, расположенными по двум концентрическим окружностям.

Для материалов высокой твердости электроды изготовляются из электропроводящей резины. Такие электроды применялись, например, в датчиках кондуктометрического влагомера, предназначенного для измерения влажности стен и других строительных ограждений и конструкций. Для этой же цели применялись проволочные щетки или густые металлические сетки, закрепленные на губчатой резине.

Автор предложил конструкцию [Л. 3-18], в которой электроды с рабочими поверхностями в одной плоскости выполнены в виде двух или нескольких концентрических металлических колец, находящихся под знакопеременными потенциалами. Внешнее кольцо заземляется, и поле распределяется только внутри участка материала, ограниченного внешним кольцом; такой датчик не реагирует на близость края материала. Односторонние электроды могут быть разделены друг от друга воздушными промежутками или же утоплены в изолирующем основании, поверхность которого совпадает с их рабочей поверхностью. В последнем случае увеличивается начальная емкость датчика, но в то же время устраняются погрешности, связанные с загрязнением воздушных промежутков между электродами. Для воспроизводимости результатов измерений необходим хороший контакт всей рабочей поверхности электродов с материалом. Это особенно важно для кондуктометрических влагомеров и представляет собой достаточно сложную задачу при неровной поверхности материала. Необходимо уменьшить рабочую поверхность отдельных электродов и создать постоянное давление на датчик; эти меры достаточны для получения хорошего контакта, если материал мягок. Рабочие и защитные (заземленные) электроды могут иметь и более сложную форму, например параллельных меандров. Односторонние датчики описанных форм удобно изготовлять тех-

никой печатных схем. Затруднения, обусловленные воздушными прослойками между электродами и объектом измерения, отпадают, если электроды выполнены в виде металлических слоев, нанесенных непосредственно на поверхность материала (влагомер для строительных конструкций и материалов [Л. 3-19]). Хорошие результаты были получены автором при измерениях влажности бетона и бетонных изделий с помощью поверхностных электродов, изготовленных вжиганием серебряной пасты. Применение электродов в виде металлических слоев целесообразно только в тех случаях, когда требуется длительный контроль влажности материала в месте их установки.

Из электродов, вводимых в толщу материала, наибольшее распространение получили так называемые «игольчатые» электроды в виде заостренных металлических стержней.

При работе с материалами невысокой твердости и надлежащем выборе диаметра игл и угла конуса введение электродов в материал не требует значительных усилий. В некоторых конструкциях датчиков каждый из электродов состоит из двух и больше игл, например из четырех игл, расположенных в вершинах прямоугольника. При работе с твердыми и сухими материалами иглы трудно вводить вручную.

Игольчатые электроды нашли практическое применение во влагомерах для ряда материалов и в первую очередь для древесины. Датчик электровлагомера ЦНИИМОД имел три стальные иглы, закрепленные в основании по прямой линии. Уменьшение изгиба контактов при их введении в древесину и извлечении из нее обеспечивается конструкцией датчика.

Недостатком игольчатых датчиков является то, что для их введения в твердые сухие материалы требуются большие усилия, расшатывающие иглы после некоторого числа измерений.

Игольчатые датчики обеспечивают хорошую воспроизводимость показаний влагомера. Игольчатые датчики-щупы с иглами значительной длины применялись для определения влажности хлопка-сырца, табака в кипах, зерна в мешках и других материалов без выемки пробы. Кроме того, игольчатые датчики применялись для мягких и пластичных материалов, таких как сливочное масло, рыба, некоторые кондитерские изделия и т. д. В рас-

смотренных конструкциях игольчатых электродов ток между электродами протекает не только через толщу материала, но и по его поверхности или в поверхностном слое. Введение игл не на полную их длину является возможным источником погрешности измерения.

Эти недостатки устранены в конструкции датчика, предложенной автором для измерения влажности естественных и искусственных смол, битумов, асфальтов и других материалов с низкой температурой плавления [Л. 0-1]. Игольчатые электроды снабжены изоляционными втулками, покрывающими верхнюю часть электродов, начиная с основания, благодаря чему при измерениях исключается проводимость поверхностного слоя материала. Второй отличительной особенностью датчика является устройство для нагрева электродов.

5. Датчики для листовых материалов. У простого датчика с двусторонним контактом, применяемого в неавтоматических диэлькометрических влагомерах для кож, электродами являются параллельные круглые металлические диски. Нижний неподвижный электрод заземлен, верхний электрод может перемещаться с помощью микрометрического винта, позволяющего одновременно определять толщину материала и вносить соответствующую поправку в показания влагомера. Для улучшения контакта между обкладками и материалом в датчиках рассмотренного типа иногда применяют прокладки из фольги или наносят слой графита на рабочие поверхности обкладок.

Другой метод измерения заключается в сохранении воздушного зазора между одной поверхностью листового материала и верхней пластиной конденсатора. Этот же датчик можно использовать для измерения методом «двух толщин»; производят измерение с исследуемым образцом листового материала между обкладками, а затем образец удаляют и верхний электрод приближают к нижнему до получения результата измерения емкости, равного первоначальному. Легко подсчитать, что диэлектрическая проницаемость материала определяется соотношением (без учета краевого эффекта)

$$\varepsilon = \frac{d_x}{d_x - d_в},$$

где d_x — толщина образца материала; $d_в$ — уменьшение зазора между электродами при втором измерении.

Таким образом, измерение ε сводится к двум линейным измерениям величин d_x и $d_в$; отпадает необходимость в контакте одного из электродов с материалом и в поддержании постоянства давления этого электрода, что является большим преимуществом, особенно при работе с мягкими материалами. То же самое можно сказать и о способе измерения с воздушным зазором. В обоих случаях точность измерения определяется главным образом точностью измерения толщины материала, а в методе двух толщин — и перемещения верхнего электрода. Если поверхности образца или электродов не строго параллельны, это вызывает погрешность измерения.

Для контроля влажности непрерывно движущегося полотна тонких листовых материалов (бумага, текстильные ткани, листы фанеры, пленочные материалы и т. п.), а также нитей применяют датчики нескольких типов.

В кондуктометрических влагомерах, предназначенных для текстильных тканей, нашли наибольшее применение датчики в виде металлических роликов, непрерывно контактирующих с движущейся тканью. Контактный ролик лежит на ткани, огибающей направляющий ролик, и сжимает ее своим весом; измеряется сопротивление поперек полотна. Для тканей, влажность которых высока, а сопротивление весьма мало, контактные ролики располагают по одну сторону ткани на значительном расстоянии друг от друга и измеряют сопротивление ткани вдоль ее длины.

Обычно распределение влаги по поверхности ткани неравномерно, и при применении роликовых датчиков возникает задача измерения средней влажности контролируемого участка ткани. В литературе описаны различные решения этой задачи. В одном из влагомеров применяются три контактных ролика, закрепленных на шарнирных подвесах и расположенных по ширине ткани следующим образом: один ролик посередине и два — по краям. Ролики электрически соединены параллельно; вторым электродом является корпус машины. Контактный ролик датчика другого влагомера имеет на своей поверхности две спиральные ленточки; при вращении ролика они соприкасаются с тканью на различных участках ее поверхности.

В диэлькометрических влагомерах для листовых материалов предпочтение отдается конденсаторным датчи-

кам, в которых контролируемый материал не соприкасается с электродами — плоскопараллельным с воздушным зазором между материалом и обкладками или, чаще всего, односторонним с «внешним полем».

Глава четвертая

ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА И ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ВЛАГОМЕРОВ

4-1. КОНДУКТОМЕТРИЧЕСКИЕ ВЛАГОМЕРЫ

Характер зависимости сопротивления датчика от влажности материала $R_x(W)$, рассмотренный в § 2-1, а также практические требования обусловливают следующие особенности измерительных устройств кондуктометрических влагомеров:

а) необходимость измерения сопротивления в весьма широком диапазоне: от 10^3—10^4 до 10^{10}—10^{11} *ом* и выше;

б) целесообразность перекрытия всего диапазона измеряемых сопротивлений минимальным числом поддиапазонов (в автоматических влагомерах — одним). Желательно, чтобы градуировочная характеристика шкалы влагомера в единицах влажности была равномерной, для чего чувствительность измерительной схемы должна быть переменной;

в) возможность измерения сопротивления датчика с относительно невысокой чувствительностью и точностью, особенно в диапазонах низкой и средней влажности;

г) невысокие напряжения на электродах, допустимые с точки зрения техники безопасности;

д) применение в измерительной цепи наряду с постоянным током также и переменного тока, преимущественно промышленной частоты.

В кондуктометрических влагомерах при относительно невысоком максимальном сопротивлении датчика ($R_x < 10^8 \div 10^9$ *ом*) используются упрощенные измерительные устройства, позволяющие быстро определить измеряемую величину без вычислений, в частности омметры магнитоэлектрической системы и с генераторами релаксационных колебаний.

Основанные на принципе омметра со стрелочным прибором измерительные схемы ряда влагомеров (например, влагомеров для зерна ВЭ-2 и TAG [Л. 0-1]) имеют в качестве источника питания батарею сухих элементов со сравнительно высоким напряжением (80—90 *в*). В кондуктометрических влагомерах, разработанных в последние годы, часто применяют транзисторный генератор повышенной частоты, питаемый от источника постоянного напряжения (сухие элементы, малогабаритные аккумуляторы).

Напряжение высокой частоты повышается трансформатором и выпрямляется полупроводниковыми диодами (иногда по схеме удвоения напряжения), благодаря чему получают относительно высокое напряжение, необходимое для цепи датчика. Такой источник питания особенно удобен для переносных приборов; без выпрямителя его можно использовать во влагомерах, работающих на звуковой частоте.

В омметрах с приборами тлеющего разряда используются релаксационные генераторы с лампой тлеющего разряда по простейшей схеме: лампа тлеющего разряда (например, неоновая), шунтированная емкостью C, присоединена через последовательное омическое сопротивление R к источнику постоянного тока с напряжением U.

Если один из сомножителей произведения RC сделать неизменным, то по частоте колебаний можно определить вторую величину: R или C. Частоту f можно определить различными способами, например по числу вспышек лампы, наблюдаемых за определенный промежуток времени.

Величиной, изменяющейся в функции сопротивления датчика, является также промежуток времени от включения цепи до первой вспышки неоновой лампы.

Достоинства измерительных цепей с лампами тлеющего разряда заключаются в простоте и надежности.

В схемах отсутствует электроизмерительный прибор, они не чувствительны к колебаниям напряжения источника тока (в определенных пределах). Однако точность измерения при применении схем этого типа невысока. Напряжения зажигания и потухания одной и той же лампы являются не постоянными величинами, а сложными функциями частоты, температуры, освещенности электродов лампы и величины разрядного тока. На результаты измерения влияют также изменения емкости и

утечки конденсаторов со временем и под действием температуры. Таким образом, релаксационные омметры с лампами тлеющего разряда представляют собой достаточно грубые измерители сопротивления.

С применением ламп тлеющего разряда можно, однако, осуществить очень простые кондуктометрические бесшкальные индикаторы и сигнализаторы. Такого рода сигнализаторы в различных модификациях нашли некоторое распространение на практике. Их относительная погрешность достигает 20—25% измеряемого сопротивления датчика.

Автоматические влагомеры во многих случаях рассчитаны на измерение влажности в сравнительно узких пределах; их измерительные схемы проще, чем у широкодиапазонных влагомеров.

В большинстве современных кондуктометрических влагомеров измерительная часть представляет собой омметр на электронных лампах или полупроводниковых приборах.

Сопротивления до 10^{11}—10^{12} *ом* можно измерять мегомметрами с применением транзисторов и усилительных ламп обычного типа. Для измерения более высоких сопротивлений применяют специальные электрометрические лампы или электронные лампы, работающие в электрометрическом режиме. Электрометрические лампы редко применяются во влагомерах; обычно верхний предел измерения ограничивают величиной 10^{10}—10^{11} *ом*. В большей части электронных омметров измеряется падение напряжения на сопротивлении с помощью вольтметра.

Электронные вольтметры автоматических и неавтоматических влагомеров можно разделить на:

а) вольтметры с измерительной схемой по методу прямого преобразования (с усилителями по неуравновешенной схеме);

б) вольтметры с измерительной схемой по методу сравнения (с применением уравновешенных усилителей).

Входная цепь одинакова в схемах обоих типов. В неавтоматических влагомерах приборы имеют одну основную шкалу, а расширение пределов измерения осуществляется с помощью входного делителя напряжения, образованного сопротивлением датчика и несколькими калиброванными резисторами. Делитель питается от стаби-

лизированного источника постоянного тока; часть делителя служит сопротивлением утечки сетки лампы.

Электронные вольтметры по методу сравнения имеют ряд преимуществ по сравнению с вольтметрами на принципе прямого преобразования, в частности меньшее влияние питающих напряжений на величину выходного напряжения и небольшой дрейф нуля.

Наиболее широкое применение нашли многопредельные омметры с ламповыми уравновешенными усилителями, в частности с мостовыми схемами с симметричным расположением двух ламп, имеющих параллельное пита-

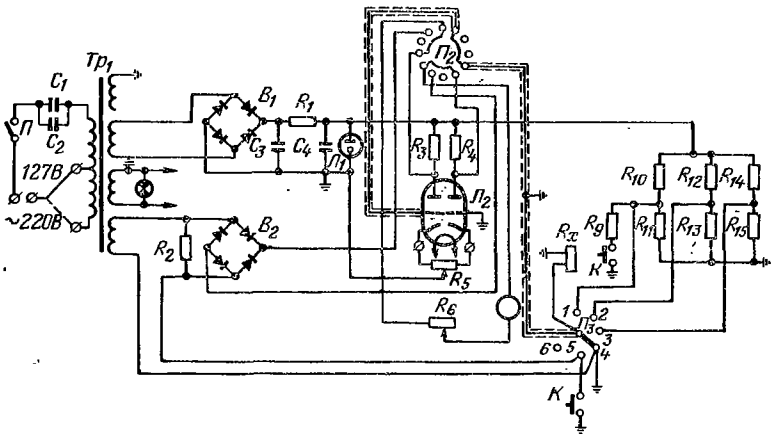


Рис. 4-1. Принципиальная схема влагомера ЭВК-1.

ние. Лампы могут иметь анодную или катодную нагрузку, а измерительный прибор включается соответственно между анодами или катодами ламп.

В качестве примера рассмотрим принципиальную схему влагомера типа ЭВК-1 для кож [Л. 3-17]). Прибор (рис. 4-1) имеет стабилизированный источник питания, состоящий из феррорезонансного стабилизатора ($Тр_1$, $С_1$, $С_2$), выпрямителя $В_1$ с фильтром $С_3$, R_1, $С_4$ и газоразрядного стабилитрона $Л_1$, который дополнительно стабилизирует напряжения анодной и сеточной цепей. Колебания напряжения питания в пределах $\pm 10\%$ номинального не влияют на показания влагомера.

Прибор позволяет измерять сопротивление датчика R_x как в цепи постоянного тока, так и при переменном

токе с частотой 50 *гц* (см. ниже). При измерениях на постоянном токе мостовую схему образуют внутренние сопротивления двойного триода $Л_2$, постоянные резисторы R_3, R_4 и потенциометр R_5.

Показывающий прибор (микроамперметр μA) включен через переключатель $П_2$ в диагональ моста. Сетка правой половины $Л_2$ заземлена, а на вторую сетку через переключатели $П_2$ и $П_3$ подается переменное по величине напряжение из цепи датчика.

На постоянном токе прибор имеет три диапазона измерения, соответствующие положениям *1*, *2* и *3* пере-

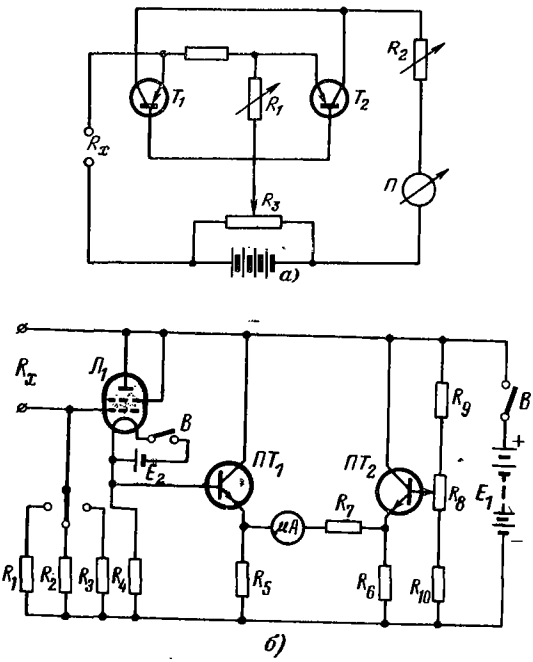


Рис. 4-2. Принципиальные схемы кондуктометрических транзисторных влагомеров.

ключателя $П_3$. Положение *4* используется для настройки электрического нуля схемы посредством потенциометра R_5. Кроме того, после выбора диапазона измерения с помощью потенциометра R_6 микроамперметр устанавливается на 100-е деление. При этом электроды датчика должны находиться в воздухе ($R_x = \infty$). Проверка показаний

прибора при наличии материала между электродами производится в положении 5 переключателя $П_3$; при этом кнопкой $К$ подключают к схеме вместо R_x образцовый резистор R_9.

Пределы измерений для каждого диапазона определяются омическими делителями из двух постоянных резисторов: R_{10}—R_{11}, R_{12}—R_{13} и R_{14}—R_{15}. Датчик подключается параллельно меньшему сопротивлению делителя с помощью коаксиального кабеля.

Усилительные уравновешенные каскады широко применяются также в измерительных схемах, построенных на транзисторах.

Простейшая схема (рис. 4-2,*а*) представляет собой уравновешенный усилитель постоянного тока, собранный на двух триодах $Т_1$ и $Т_2$. Датчик R_x включен в цепь эмиттера триода $Т_1$; второй триод является компенсирующим. Переменные резисторы R_1 и R_2 служат соответственно для регулировки нуля и чувствительности измерительного прибора $П$, включенного в коллекторную цепь.

Более сложную входную цепь, позволяющую охватить широкий диапазон сопротивления датчика до очень больших значений, имеет влагомер для древесины.

В эту цепь (рис. 4-2,*б*) входит катодный повторитель на электрометрическом триоде $Л_1$, присоединенный к выходу омического делителя напряжения, состоящего из сопротивления датчика R_x и набора из трех постоянных резисторов R_1—R_3, соответствующих диапазонам влажности: 6—13, 12—21 и 20—70%. К выходу катодного повторителя присоединен один из входов уравновешенного усилителя, собранного на двух полупроводниковых триодах. База второго триода присоединена к движку потенциометра, подключенного к источнику питания. Между эмиттерами обоих триодов включен микроамперметр со шкалой, градуированной в процентах влажности древесины. Установка нуля производится при нахождении электродов датчика в воздухе перемещением движка потенциометра R_8. В качестве источников питания используются две батареи сухих элементов (E_1 и E_2) напряжением 22,5 и 1,3 *в*.

В измерительных устройствах, работающих на переменном токе, чаще всего применяются схемы измерения полного сопротивления датчика при частоте 50 *гц*. Из них наибольшее распространение получила простейшая схема последовательного омметра с магнитоэлектриче-

ским прибором детекторной системы (рис. 4-3,*а*); резистор, включенный последовательно с прибором, позволяет подключать к выходу схемы *6* автоматический потенциометр. Недостатком последовательного омметра, как и при измерениях на постоянном токе, являются малые чувствительность и точность в начале и конце шкалы.

От этих недостатков в значительной степени свободен измеритель полных сопротивлений по дифференциальной схеме [Л. 4-1].

В двух цепях *I* и *II* (рис. 4-3,*б*), питаемых от сети переменного тока посредством двух одинаковых понижающих обмоток трансформатора *1*, действуют одинако-

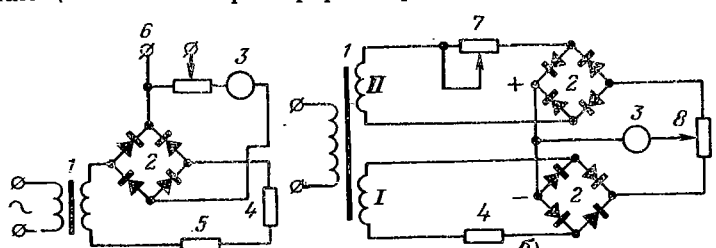


Рис. 4-3. Принципиальные схемы омметров переменного тока.

а — последовательная; *б* — дифференциальная; *1* — понижающий трансформатор; *2* — выпрямитель; *3* — микроамперметр; *4* — измеряемое сопротивление; *5* — ограничивающее сопротивление; *6* — к автоматическому потенциометру; *7* — уравновешивающий потенциометр; *8* — потенциометр для настройки нуля.

вые по амплитуде и фазе э. д. с. Цепь *I* содержит сопротивление *4* датчика; в цепь *II* включено переменное сопротивление *7*. Токи в обеих цепях выпрямляются двумя одинаковыми выпрямителями *2*, собранными по мостовой схеме. Выпрямители включены навстречу с полярностью, указанной на рисунке, и прибор *3* показывает разность выпрямленных токов обеих цепей.

Измерение по компенсационному (нулевому) методу сводится к уравновешиванию измеряемого (полного) сопротивления *4* переменным сопротивлением *7*; указателем равновесия служит прибор *3*. Для предварительной настройки схемы на нуль используется потенциометр *8*, при этом в цепь *I* вместо датчика вводится образцовое сопротивление.

Можно также измерять разность выпрямленных напряжений обоих выпрямителей, являющуюся функцией сопротивления *4*, с помощью автоматического электрон-

ного потенциометра. В этом случае необходима стабилизация величины напряжения питания.

Схема отличается простотой и независимостью результатов измерения от колебаний напряжения питания в широких пределах. Чувствительность измерений возрастает с увеличением сопротивления R_x по закону, близкому к линейной зависимости от $\lg R_x$, т. е. пропорционально уменьшению влажности. Известны дифференциальные схемы переменного тока с усилителем, собранным на двойном триоде (или двух транзисторах).

Применяются также электронные мегомметры переменного тока, основанные на сравнении напряжений на датчике и образцовом сопротивлении, т. е. на том же принципе, что и описанные приборы постоянного тока. В некоторых приборах предусматривается возможность измерения сопротивления датчика как при постоянном, так и при переменном токе; переменный ток используется для диапазонов, соответствующих повышенной влажности. У влагомера ЭВК-1 (рис. 4-1) измерительная цепь переменного тока выполнена по схеме последовательного омметра и состоит из обмотки трансформатора Tp_1, сопротивления R_x, включаемого переключателями последовательно с микроамперметром и выпрямителем B_2.

У всех рассмотренных омметров характер зависимости сопротивления датчика от влажности материала $R_x(W)$ определяет нелинейность шкалы влагомера при ее градуировке в процентах влажности. Неравномерность шкалы несколько сглаживается в многопредельных приборах при исключении в каждом из диапазонов крайних участков шкалы.

Более удобны влагомеры с широким диапазоном измерений без переключения пределов, что, в частности, желательно для автоматических приборов. Получение равномерной шкалы в широком диапазоне влажности, соответствующем линейному участку зависимости $\lg R_x(W)$, достигается в мостовых уравновешенных и неуравновешенных схемах применением функциональных (логарифмических) потенциометров или выбором значений постоянных сопротивлений, образующих три плеча моста.

Для спрямления шкалы омметров со стрелочными показывающими приборами применяется схема [Л. 4-2], состоящая из последовательно включенных сопротивления датчика X, добавочного сопротивления R, величину

которого можно изменять ступенями с помощью переключателя, и источника постоянного напряжения $U=$ $=$const. Падение напряжения на добавочном сопротивлении R в определенных пределах является линейной функцией $\lg X$.

Значительный интерес представляет (особенно для широкодиапазонных автоматических влагомеров) возможность переключать ступени R не вручную, а автоматически. Эта задача была решена [Л. 4-3] введением функционального преобразователя типа диодной матрицы между датчиком (сопротивление X) и входом электронного вольтметра. Потенциальный электрод датчика соединен с выводами омического делителя напряжения несколькими цепями, каждая из которых содержит диод и последовательно включенный резистор. При сопротивлении $X\longrightarrow\infty$, т. е. малом входном напряжении преобразователя, все диоды заперты. По мере уменьшения X и возрастания входного напряжения диоды поочередно отпираются и параллельно постоянному сопротивлению R включается все большее число резисторов.

Шкалу влагомеров с ламповыми вольтметрами можно спрямить с помощью логарифмических усилителей, т. е. усилителей, имеющих логарифмическую зависимость выходного напряжения от входного [Л. 4-4].

Дополнительные погрешности кондуктометрических влагомеров. Результаты измерений в кондуктометрических влагомерах зависят не только от средней влажности материала, но и от многих других факторов: а) формы и взаимного расположения электродов; б) стадии завершения переходного процесса в электрической цепи в момент отсчета; в) напряжения источника питания; г) температуры материала; д) химического состава материала; е) степени однородности материала, а у дисперсного материала и от степени его уплотнения; ж) распределения влаги в материале; з) рода тока (его частоты).

При измерении проводимости в цепи постоянного тока при постоянной величине напряжения у влажных материалов наблюдается уменьшение со временем проводимости, а следовательно, и силы тока в цепи. Явление убывания силы тока во времени может быть объяснено появлением в диэлектрике нарастающей э. д. с. поляризации, противодействующей приложенному напряжению. Скорость уменьшения силы тока во времени постепенно

снижается. Явление спадания тока усиливается с ростом влажности; оно зависит и от химического состава материала.

В связи с ионным характером проводимости влажных материалов явление поляризации в этих материалах подчиняется законам, подобным законам поляризации в растворах электролитов. Эффект поляризации усиливается с ростом напряженности электрического поля, т. е. с увеличением напряжения, приложенного к электродам, а также с увеличением плотности тока на электродах.

Определенное значение имеют конструкция электродов и материал, из которого они изготовлены. Так, например, при измерении влажности сыпучих материалов принудительное сжатие образца материала уменьшает эффект поляризации. При измерении влажности посредством вращающихся электродов спадания тока во времени не обнаруживается.

Спадание тока, проявлением которого является кажущееся увеличение сопротивления датчика, может служить причиной погрешности измерения, величина которой зависит от промежутка времени между включением влагомера и моментом отсчета.

Наиболее эффективным способом борьбы с поляризацией является измерение сопротивления датчика в цепи переменного тока. Однако при применении тока частотой 50 *гц* явление поляризации, особенно при повышенной влажности, сохраняется в достаточно сильной степени. Для полного его устранения необходимо повысить частоту до предела, обусловленного конкретными условиями измерения (максимальной влажностью и химическим составом исследуемого материала, конструкцией датчика, материалом электродов и т. п.). Как правило, эта частота находится в звуковом диапазоне. Необходимо подчеркнуть, что применение переменного тока, устраняя или ослабляя эффект поляризации, не оказывает существенного влияния на другие характеристики кондуктометрического метода измерения влажности; изменяется лишь абсолютная величина сопротивления датчика.

С ионным характером проводимости связано влияние и другого электрического параметра — величины напряжения, приложенного к электродам. Сквозная проводимость образца влажного материала зависит от величи-

ны приложенного напряжения (при прочих неизменных условиях измерения). Величина сопротивления изменяется по гиперболической кривой, характерной для полупроводников: при повышении напряжения сопротивление уменьшается. Это обстоятельство имеет особое значение для кондуктометрических влагомеров по схеме многопредельного омметра. Если различным поддиапазонам соответствуют неодинаковые напряжения на электродах, то одной и той же влажности соответствуют различные величины измеряемого сопротивления R_x на соседних перекрывающихся поддиапазонах.

Из факторов, связанных со свойствами и состоянием материала, наибольшее значение имеет влияние температуры материала. Сопротивление капиллярнопористых материалов, как и всех диэлектриков с ионной проводимостью и большинства полупроводников, уменьшается с повышением температуры. Зависимость сопротивления R_x влажных материалов от температуры t описывается показательной функцией

$$R_x = k_1 e^{-k_2 t}, \qquad (4\text{-}1)$$

где k_1, k_2 — постоянные положительные коэффициенты, характерные для данного материала при определенных условиях измерения.

Логарифмирование (4-1) дает:

$$\lg R_x = \lg k_1 - k_2 t \lg e = A - Bt,$$

где A и B — постоянные.

Температурная зависимость сопротивления материала имеет, следовательно, такой же характер, как и зависимость этого сопротивления от влажности при малой и средней влажности [см. формулу (2-2)].

Линейная зависимость $\lg R_x$ от температуры подтверждается и экспериментальными данными, полученными автором. На рис. 4-4 представлена эта зависимость для трех образцов зерна пшеницы и ржи при постоянной влажности образцов. Кривая *1* была получена на датчике с вращающимися электродами, кривые *2* и *3* — на датчике с прессованием образца.

В пределах линейной зависимости $\lg R_x(W)$ влияние температуры на результаты измерения влажности можно

учесть, вводя поправку, пропорциональную отклонению температуры материала от значения температуры, при котором градуировался влагомер. Расчетное значение температуры обычно указывается на шкале влагомера или в градуировочных таблицах (графиках). Величина температурной поправки выражается в процентах влажности и также приводится в градуировочных таблицах влагомера. С ростом влажности и температуры величина температурной поправки изменяется достаточно сложным образом.

Обычно для упрощения расчетов величину температурной поправки усредняют и принимают одинаковой для всего диапазона измерений температуры и влажности. У большинства материалов она близка к 0,08—0,1% влажности на 1 °С, а при высоких температурах и влагосодержаниях может иметь значительно большую величину. При температуре материала выше нормальной поправку следует вычитать из результата измерения, выраженного в процентах влажности; если температура материала ниже нормальной, поправку прибавляют к результату измерения.

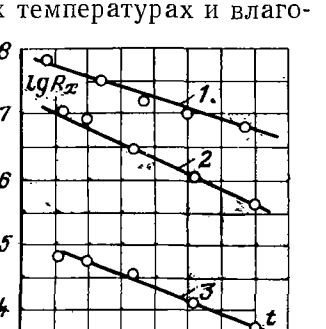


Рис. 4-4. Влияние температуры зерна на сопротивление датчика.

1 — пшеница, W=11,4% (влагомер ТАG); *2* — рожь, W=14,3%; *3* — пшеница W=18,1% (влагомер ВП-4).

Следующими важными факторами являются химический состав и строение материала. Известно, что электропроводность смесей аддитивно зависит от значений электропроводности отдельных компонентов. Характерной особенностью проводимости диэлектриков является высокая чувствительность к примесям и загрязнениям. Наличие в материале ионов солей, кислот или щелочей оказывает сильное влияние на результаты измерения влажности по кондуктометрическому методу, влияние электролитов возрастает с ростом влажности материала. При большом содержании элекролитов надежные результаты можно получить лишь при условии постоянства их концентрации; в противном случае кондуктометрический метод имеет большие погрешности. В качестве примера укажем на данные, относящиеся к текстильным

тканям. Функция $R_x(W)$ для определенной ткани выражается семейством кривых, зависящих: а) от удельного сопротивления электролита; б) от его природы (растворы кислот или солей); в) от способа удаления влаги (при отжиме концентрация электролитов постоянна, при сушке концентрация увеличивается). Расхождения между крайними кривыми достигают 10% влажности. Значительное влияние могут оказать и непроводящие примеси и загрязнения. Так, например, были установлены большие погрешности при измерении влажности зерна, сильно загрязненного минеральными примесями (пыль, комки земли и т. п.).

Влияние неоднородности строения вещества сильно проявляется, например, у древесины. Электрические свойства древесины при поперечном или продольном распиле дерева неодинаковы. Если рассмотреть зависимость активной проводимости древесины от влажности, то максимальная проводимость наблюдается вдоль радиальных лучей, меньшая проводимость соответствует измерениям вдоль ствола и минимальная — измерениям поперек ствола. Так же у других волокнистых материалов растительного происхождения удельное сопротивление вдоль волокон обычно меньше, чем поперек волокна. У каменного угля в блоках проводимость в плоскости, параллельной слоям, в несколько раз больше, чем в перпендикулярном направлении.

На проводимость биологических материалов оказывают влияние изменения биохимических, ферментативных и других процессов, происходящих в этих материалах.

Из факторов, относящихся к состоянию влаги в материале, наибольшее влияние на проводимость, как и на другие электрические свойства, оказывает распределение влаги в материале. При одной и той же величине средней влажности образца неравномерное распределение влаги изменяет электрические свойства образца. Роль этого фактора особенно возрастает после искусственного перераспределения влаги в материале. Так, после увлажнения поверхностные и прилегающие к ним слои материала оказываются более влажными по сравнению с внутренними слоями. Аналогично после сушки (за исключением сушки токами высокой частоты) внешние слои материала имеют влажность более низкую, чем внутренние. В обоих случаях кондуктометрический элек-

тровлагомер дает неправильные показания; устойчивые результаты измерения будут получены после выравнивания влажности всех частей исследуемого образца.

При увлажнении поглощением водяных паров из воздуха влага распределяется более равномерно, чем при увлажнении водой. Скорость достижения равновесного состояния определяется главным образом сорбционными свойствами самого материала. Некоторое значение имеет также конструкция датчика. Отмеченное явление во всех случаях исключает возможность применения кондуктометрических влагомеров для измерения влажности материалов непосредственно после их искусственного увлажнения или замачивания, а также при наличии влаги или снега на поверхности материала и т. п.

Строго говоря, кондуктометрические влагомеры могут применяться лишь после достижения перед измерением равновесного распределения влаги в материале.

Известно, что состояние полного гигроскопического равновесия с окружающей средой достигается в течение весьма длительного времени. Однако практически влагомеры начинают давать устойчивые показания значительно быстрее, как только влияние неравномерности распределения влаги станет меньше погрешности измерения.

У материалов растительного и животного происхождения из факторов, связанных с характером распределения влаги, на проводимость может оказать влияние «история влажности» материала, т. е. характер изменений его влажности до измерения. Возможность такого влияния связана с тем, что в процессе сушки и увлажнения материалов изменяются не только количество влаги и ее распределение, но и форма связи с сухим веществом, а также и некоторые физические свойства высушиваемого материала. Однако в экспериментальных исследованиях это влияние не обнаружено.

Рассмотренные в этом параграфе факторы отраничивают точность и возможности применения кондуктометрических влагомеров; к ним следует добавить сильное влияние на результаты измерения контактного сопротивления между электродами и материалом, зависящего от состояния контактирующих поверхностей и давления электродов на материал.

4-2. ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА ДИЭЛЬКОМЕТРИЧЕСКИХ ВЛАГОМЕРОВ С РАБОЧЕЙ ЧАСТОТОЙ НИЖЕ 100 *Мгц*

Диэлькометрические влагомеры (исключая влагомеры СВЧ) работают в диапазоне частот от десятков килогерц до десятков мегагерц; наиболее распространенным является диапазон от сотен килогерц до 10—15 *Мгц*.

В указанных диапазонах датчик представляет собой комплексное сопротивление, в котором преобладает реактивная (емкостная) или активная составляющая.

Для измерения полного сопротивления датчика или его составляющих нашли применение многочисленные измерительные схемы, основанные на известных методах радиотехнических измерений и измерений параметров диэлектриков [Л. 4-5]. Однако диэлектрические измерения влажности материалов имеют ряд особенностей.

Максимальная емкость датчиков обычно ограничена десятками пикофарад и редко превышает 100 *пф*; в то же время $\operatorname{tg}\delta$ датчика с материалом может достигать нескольких единиц и больше.

Современные влагомеры градуируются эмпирически. Поэтому от измерительных устройств не требуется определения действительных значений ε и $\operatorname{tg}\delta$ материала. Не следует также предъявлять слишком высокие требования к погрешности измерительного устройства, так как она не является основной составляющей общей погрешности влагомера. Классификация измерительных устройств диэлькометрических влагомеров может быть основана на различных признаках. По характеру измеряемой входной величины датчика их можно разделить на устройства для измерения полного сопротивления датчика и на измерительные устройства с разделением составляющих, дающие информацию о величине реактивной или активной составляющей комплексного сопротивления.

В обеих группах измерительных устройств находят применение:

а) резонансные схемы, использующие явление резонанса в колебательном контуре с сосредоточенными постоянными, одним из элементов которого является датчик;

б) схемы измерения полного сопротивления без использования явления резонанса: мостовые, дифференци-

альные и т. д. Основная разница между обеими категориями заключается в роли генератора колебаний повышенной частоты: в резонансных схемах генератор является составной частью измерительной цепи, в то время как в схемах второго типа он служит лишь источником питания измерительной цепи.

Резонансные схемы можно в свою очередь разделить по характеру выходной величины на контурные и генераторные [Л. 4-6]. У первых выходной величиной является один из параметров колебательного контура (в том числе его резонансная частота). В генераторных схемах выходной величиной является частота колебаний генератора или амплитуда этих колебаний, токи и напряжения генератора.

Е. С. Кричевский [Л. 3-1] делит измерительные схемы на четыре типа: Z-метры и Y-метры, реагирующие на изменение модуля соответственно комплексного сопротивления и комплексной проводимости датчика; Q-метры, реагирующие на изменение его добротности, и F-метры, реагирующие на изменение частоты автогенератора при включении датчика в его колебательный контур.

Наконец, классификационным признаком может служить используемый способ измерения — с прямым преобразованием (включающий неуравновешенные мостовые и дифференциальные схемы) и с уравновешиванием. В схемах с уравновешиванием часто применяется способ замещения.

Из рассмотренных классификационных признаков основным является способ учета диэлектрических потерь в датчике влагомера (измерение с разделением или без разделения составляющих полного сопротивления).

При измерениях полного сопротивления датчика его проводимость прямо влияет на результат измерения.

В резонансных схемах ее влияние на параметры колебательного контура и генератора высокой частоты сводится к следующему:

1. В резонансных схемах чаще всего применяются LC-генераторы с самовозбуждением. При наличии диэлектрических потерь в датчике, входящем в колебательный контур, угловая частота собственных колебаний генератора ω не равна резонансной частоте идеального контура (т. е. контура без потерь) $\omega_0 = 1/\sqrt{LC}$ (L — индуктивность контура, C — емкость).

Влияние потерь на частоту описывает соотношение

$$\omega = \omega_0 \sqrt{\frac{1 + \operatorname{tg}^2 \delta}{1 + 1/Q_L^2}},$$

где $\operatorname{tg} \delta$ — тангенс угла диэлектрических потерь датчика; Q_L — добротность катушки индуктивности на резонансной частоте.

2. Условие самовозбуждения генератора выполняется при уменьшении резонансного сопротивления контура лишь до определенной величины, которой соответствует минимальное допустимое сопротивление R_x датчика. Если R_x ниже этой величины, происходит срыв колебаний. Известно, что любой генератор незатухающих колебаний эквивалентен некоторому отрицательному сопротивлению R_-, вносимому в контур для компенсации его активных потерь.

Для возникновения колебаний в параллельном контуре, включенном параллельно отрицательному сопротивлению, необходимо, чтобы его резонансное сопротивление было больше R_-.

3. Амплитуда и ширина резонансной кривой зависят от добротности $Q_к$ колебательного контура. Для контуров с последовательным и параллельным питанием отношение A ординат резонансной кривой к максимальному значению равно:

$$A = \frac{1}{\sqrt{1 + Q_к^2 \Delta^2}},$$

где $Q_к$ — добротность контура; Δ — относительная расстройка контура,

$$\Delta = \frac{\Delta C}{C_0} = 2 \frac{\Delta \omega}{\omega_0}$$

(ΔC и $\Delta \omega$ — приращения емкости и частоты относительно значений C_0 и ω_0, соответствующих резонансу в идеальном контуре).

При больших потерях в датчике $Q_к \approx Q_x = 1/\operatorname{tg} \delta_x$ (Q_x, $\operatorname{tg} \delta_x$ — добротность и тангенс угла диэлектрических потерь датчика). Следовательно, с ростом потерь в датчике уменьшается пик резонансной кривой, кривая становится более широкой и пологой, а ее максимум — расплывчатым, что ухудшает остроту и уменьшает точность настройки в резонансе.

Если не выполняется условие $\operatorname{tg}\delta_x \longrightarrow 0$, измерительные схемы, основанные на измерении комплексного сопротивления, не позволяют непосредственно определить диэлектрическую проницаемость ε материала, заполняющего датчик; это возможно только при измерении реактивной составляющей комплексного сопротивления датчика.

Существуют два различных воззрения на измерительные устройства диэлькометрических влагомеров, сводящиеся к следующему:

1. Проводимость датчика является функцией влажности материала, и, следовательно, допустимо применение измерительных схем, реагирующих на изменение обеих составляющих полного сопротивления датчика. Во влагомерах этого типа зависимость результата измерения от $\operatorname{tg}\delta$ материала учитывается эмпирической градуировкой в единицах влажности, а отмеченное выше отрицательное влияние проводимости датчика на точность измерения рассматривается как помеха, воздействующая только на измерительное устройство. Влияние этой помехи ограничивается способами, описываемыми ниже.

При таком подходе достигается значительное упрощение и удешевление измерительных устройств по сравнению с устройствами для измерения модуля или фазы полного сопротивления.

Опыт подтверждает возможность измерения влажности многих материалов указанным методом с практически достаточной точностью. Это относится к случаям, когда емкостная составляющая существенно превалирует над активной: измерение малых влагосодержаний нефтей, влажности зерна и других материалов с малым содержанием электролитов. Допустимо и большое содержание электролитов в материале при условии постоянства их концентрации и состава.

В более общем виде это условие сводится к малой зависимости проводимости материала от факторов других, чем влажность, или в крайнем случае к возможности учета этих факторов (градуировкой по сортам или видам материала, компенсацией в измерительном устройстве).

2. Физическая природа ε и $\operatorname{tg}\delta$ влагосодержащих материалов различна, и связь между этими параметрами изменяется при увеличении влажности в зависимости от таких факторов, как химический состав сухого материа-

ла, проводимость воды, капиллярная структура материала, величина его удельной поверхности и т. д.

Величина ε материала изменяется однозначно в функции влажности материала, в то время как на проводимость влияют перечисленные факторы, а по мнению некоторых исследователей и другие свойства материала.

Согласно этому воззрению изменения проводимости являются возмущением, воздействующим не только на измерительное устройство, но и на преобразование влажности в электрический параметр материала (компонента вектора $\bar{z}$ на рис. В-2).

Логическим следствием является необходимость исключения влияния проводимости материала при измерениях влажности. Это реализуется в измерительных устройствах с подавлением влияния диэлектрических потерь или с разделением составляющих полного сопротивления датчика. Такие измерительные устройства сложнее и дороже устройств, измеряющих комплексный параметр датчика, однако их применение оправдано, например, для материалов с большими диэлектрическими потерями, изменяющимися в связи с переменным химическим составом воды и твердой фазы.

Ниже описываются измерительные устройства, основанные на обоих рассмотренных принципах.

Следует отметить, что в качестве элементов с управляемыми параметрами в современных диэлькометрических влагомерах часто используют статические бесконтактные элементы: подогревные термисторы, варикапы, варисторы, электронные лампы, полупроводниковые диоды и т. д. Управление выходным параметром осуществляется изменением подаваемого на эти элементы тока или напряжения.

Замена традиционных потенциометров и конденсаторов переменной емкости более простыми и надежными бесконтактными элементами особенно эффективна в схемах автоматических влагомеров, так как устраняет необходимость в сервоусилителе, реверсивном двигателе и т. п.; управляемые бесконтактные элементы отличаются высоким быстродействием (у наиболее инерционных элементов из числа упомянутых постоянная времени исчисляется миллисекундами). В то же время эти элементы уступают по стабильности, линейности функции преобразования и диапазону выходной величины переменным резисторам и конденсаторам. В связи с этим они

часто используются не в качестве уравновешивающих (отсчетных) элементов схемы, а для компенсации влияния помех.

Приведем обзор применяемых в измерительных устройствах способов компенсации влияния проводимости и других возмущающих воздействий.

В схемах без разделения составляющих полного сопротивления ослабление влияния проводимости часто достигается включением последовательно с датчиком разделительной емкости (см. § 3-1).

Другой способ заключается в шунтировании датчика малым активным сопротивлением r. Если исходить из параллельной схемы замещения и принять, что величина потерь в датчике определяется только активными сопротивлениями R и r, причем $r=R/m$ $(m\gg 1)$, то после подключения сопротивления r тангенс угла потерь датчика изменится с $\operatorname{tg}\delta=1/\omega RC$ до значения

$$\operatorname{tg}\delta_э=\frac{1}{\omega RC\,\frac{r}{R+r}}=(m+1)\operatorname{tg}\delta.$$

При изменении сопротивления потерь шунтированного датчика (вследствие изменений влажности материала, его состава и т. п.) до величины $R'=nR$ новое значение $\operatorname{tg}\delta$ будет:

$$\operatorname{tg}\delta'_э=\frac{1}{\omega RC\,\frac{nr}{nR+r}}=\left(m+\frac{1}{n}\right)\operatorname{tg}\delta.$$

Таким образом, при изменениях активного сопротивления датчика от R до ∞ тангенс угла потерь датчика изменяется в весьма узких пределах — в $(m+1)\div m$ раз.

Обычно принимают $r\leqslant R_{мин}/10$, где $R_{мин}$ — минимальная величина сопротивления потерь, соответствующая максимальной измеряемой влажности.

Описанный способ весьма прост, однако он требует постоянства сопротивления r во времени и, что важнее, при любой влажности измерение проводится при максимальном $\operatorname{tg}\delta$, т. е. в наиболее неблагоприятных условиях. Если датчик включен в колебательный контур высокочастотного генератора, его сопротивление с шунтом должно быть больше величины, при которой происходит срыв ко-

лебаний генератора. В связи с этим в практических схемах влагомеров одновременно с шунтированием датчика часто применяют и последовательную емкость.

В работе [Л. 4-7] была предложена схема с автоматической стабилизацией величины шунтирующего сопротивления r — терморезистора косвенного подогрева. Датчик включен одновременно в две мостовые схемы: высокочастотную (для измерения влажности) и низкочастотную (для автоматического регулирования величины r). Сигнал разбаланса низкочастотного (50 *гц*) моста, усиленный фазочувствительным усилителем, изменяет силу тока в цепи подогрева терморезистора до достижения суммарным активным сопротивлением шунтированного датчика заданного значения.

Для уменьшения влияния проводимости можно использовать также выбор измерительной схемы, некоторых ее элементов и параметров.

Уменьшение добротности измерительного колебательного контура при росте потерь в датчике сильно увеличивает погрешности резонансных схем, основанных на настройке в резонанс. Значительно меньше этот фактор влияет на точность схем, основанных на сравнении частот двух генераторов или контуров, например схемы биений.

Обеспечение реактивного характера комплексного сопротивления Z датчика (выполнение условия $R\omega C \gg 1$ для параллельной схемы замещения) облегчается повышением частоты ω. Однако величина $T=RC=\varepsilon_0\varepsilon\rho$ зависит от удельных электрических свойств ε и ρ материала. Поэтому рабочую частоту следует выбирать только на основании частотных характеристик $\varepsilon(\omega)$ и $\rho(\omega)$ данного материала.

Средством уменьшения влияния проводимости датчика на генератор высокой частоты является также минимальный отбор мощности измерительным колебательным контуром, повышающий устойчивость частоты генератора и устраняющий явление затягивания частоты. Для этого измерительный контур обычно имеет слабую связь с генератором. Еще больший эффект дает включение датчика во вторичный контур (колебательный или апериодический), слабо связанный с колебательным контуром генератора индуктивной, автотрансформаторной или емкостной связью. Наличие вторичной цепи, индуктивно связанной с контуром, вносит в него добавочное комп-

лексное сопротивление

$$Z = \frac{\omega^2 M^2}{Z_k}, \qquad (4\text{-}2)$$

де M — взаимная индуктивность между катушками; $Z_к$ — полное сопротивление вторичного контура.

При надлежащем выборе параметров обоих контуров и связи между ними можно уменьшить активную составляющую и усилить влияние реактивной составляющей сопротивления, вносимого вторым контуром в первый.

Подавлению влияния проводимости способствует также выбор схемы генератора, отличающейся малой чувствительностью к колебаниям нагрузки. К этой категории относятся, например, транзитронный генератор с низким отрицательным сопротивлением, генераторы по схеме Франклина, а также с применением буферного каскада, развязывающего автогенератор от нагрузки.

Кроме влияния потерь, в измерительном устройстве можно ослабить или исключить и некоторые другие возмущения. Во многих влагомерах датчик должен находиться на значительном расстоянии от измерительной схемы. Иногда монтируют входную часть измерительной схемы в непосредственной близости от датчика. Однако такое решение не всегда возможно и часто (например, в автоматических влагомерах) длина соединительного кабеля достигает десятков метров. Изменения параметров кабеля под влиянием колебаний температуры окружающей среды и других факторов вызывают дополнительные погрешности; кроме того, включение большей емкости кабеля параллельно датчику уменьшает чувствительность влагомера.

Для устранения влияния соединительного кабеля на измерительную схему емкостного влагомера был предложен ряд способов.

Первый из них можно применить при включении датчика в колебательный контур в сеточной цепи лампового генератора. Последовательно с катушкой индуктивности L_1 этого контура включают индуктивность L_2 и конденсатор C_2; величины L_2 и C_2 подбирают так, чтобы они вместе с емкостью кабеля образовали последовательный контур с резонансной частотой, равной частоте генератора. В этих условиях сопротивление контура L_2-C_2-кабель равно активному сопротивлению катушки L_2 и соедини-

тельных проводов (если пренебречь сопротивлениями утечки конденсатора C_2 и кабеля) и, следовательно, очень мало.

Второй более сложный способ заключается в применении схемы частотной модуляции с двухконтурным генератором, в которой соединительный кабель входит в первый контур, а датчик — во второй [Л. 4-8].

Влияние параметров соединительного кабеля можно исключить также в некоторых мостовых схемах, например в мостах переменного тока с тесной индуктивной связью между плечами и в схемах с низкочастотной модуляцией параметров колебательного контура и автоматическим уравновешиванием (см. ниже).

В измерительных схемах большинства диэлькометрических влагомеров предусмотрена возможность настройки «электрического нуля» и чувствительности схемы. Если функция преобразования измерительного устройства линейна, ее коррекция по двум точкам устраняет систематическую погрешность. Кроме того, эта коррекция дает возможность использования единой шкалы для различных сортов одного материала или для нескольких материалов (также при условии линейности градуировочной характеристики). Общепринятой является настройка по емкости пустого датчика C_0.

В автоматических влагомерах с проточными датчиками возникают затруднения, связанные с необходимостью опорожнения датчика для настройки и с возможностью ошибки, вызванной загрязнением датчика, например налипанием частиц материала на его электродах. Поэтому в приборах этого типа часто ограничиваются автоматической или полуавтоматической настройкой по двум или одной образцовым емкостям. Наиболее распространенным элементом настройки у резонансных влагомеров является переменная емкость, включенная параллельно датчику. Значительно реже используют для настройки индуктивность колебательного контура.

Одно из основных возмущений — изменение температуры исследуемого материала — компенсируется во многих диэлькометрических влагомерах (в частности, в приборах непрерывного действия) автоматически следующими способами:

1. Введением емкостного преобразователя термокомпенсатора в колебательный контур, чаще всего параллельно емкостному датчику.

В качестве термокомпенсатора, кроме устройств, рассмотренных в § 3-2, можно использовать также варикапы. Управляющее напряжение варикапа получают на выходе измерительной схемы (мостовой, дифференциальной и т. п.), в которую входит датчик температуры — малоинерционный термометр сопротивления или чаще миниатюрный термистор, установленные в датчике влагомера.

2. Введением выходной величины (напряжения, силы тока) измерительной цепи температурного датчика в измерительную схему влагомера — обычно на ее выход. Этот способ применим не только в резонансных, но также в мостовых и любых других схемах диэлькометрических влагомеров.

3. В схемах, основанных на принципе сравнения, использованием двух датчиков, из которых один служит датчиком влажности, а второй — опорный — термокомпенсатором.

Опорный датчик заполнен материалом с $W=\text{const}$ (например, $W=0$), имеющим температурный коэффициент, близкий по величине к коэффициенту контролируемого материала. Конструкция датчика должна обеспечивать хорошую термическую связь опорного датчика с объектом измерения, например его омывание потоком материала. Практически такое решение нашло применение во влагомерах для жидкостей (нефтепродуктов) с проточным датчиком.

Общие требования к схемам температурной компенсации заключаются в возможности независимой настройки ее параметров: а) диапазона температурной компенсации; б) величины температурной поправки, которая может изменяться в зависимости от исследуемого материала и значения температуры; значительно реже учитывают ее зависимость от влажности. В большинстве случаев осуществляется простейший — линейный — закон термокомпенсации и предусматривается лишь возможность изменения (вручную) значения температурной поправки.

В схемах с уравновешиванием отсчетным органом часто служит измерительный (переменный) конденсатор и характер градуировки шкалы в процентах влажности определяется формой зависимостей эффективной емкости датчика от влажности материала $C_x(W)$ и измерительной

ного конденсатора от угла поворота его подвижной части (ротора).

Резонансные измерительные схемы. Точность их определяется главным образом точностью настройки в резонанс, устойчивостью частоты генератора высокой частоты в течение времени измерения и чувствительностью указателя резонанса. При условии правильного построения и надлежащего выполнения (качество деталей и монтажа) резонансные схемы позволяют осуществлять чрезвычайно простые и надежные влагомеры, отличающиеся в то же время точностью и чувствительностью измерительной части.

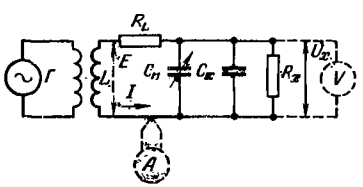


Рис. 4-5. Схема измерения методом резонанса и замещения.

В схемах (на принципе замещения и др.), где в качестве отсчетного органа или образцовых элементов для настройки схемы используются конденсаторы, дополнительным источником погрешностей могут служить измерительный и образцовые конденсаторы. Измерительный конденсатор должен иметь правильную конструкцию и тщательное выполнение. Образцовые и измерительные конденсаторы должны иметь минимальный температурный коэффициент, а также минимальные и постоянные потери при рабочей частоте.

Простейшей является схема измерения методом резонанса и замещения в колебательном контуре (рис. 4-5). Генератор $Г$ высокой частоты индуктивно связан с колебательным контуром, содержащим индуктивность L и параллельно включенные переменный конденсатор $C_п$ и датчик (C_x, R_x). Контур настраивается в резонанс с частотой генератора с помощью переменного конденсатора.

Резонанс можно определить:

а) по максимуму силы тока I в неразветвленной части контура, измеряемой с помощью амперметра A;

б) по максимуму напряжения U_x на конденсаторе, измеряемого ламповым вольтметром V.

Рассмотрим основные зависимости в обоих случаях, исходя из упрощающих предположений, что напряжение генератора имеет постоянные амплитуду и частоту, т. е. не зависит от параметров контура, и что активное сопротивление индуктивной катушки ничтожно по сравнению

с ее индуктивным сопротивлением ($R_L=0$). Примем следующие обозначения:

E — э. д. с., действующая в контуре; $C=C_x+C_п$ — суммарная емкость контура; $\omega_0=1/\sqrt{LC}$ — угловая частота колебаний при отсутствии потерь в контуре; C_0 — емкость, соответствующая резонансу в тех же условиях.

а) Определение резонанса по максимуму силы тока. Легко доказать, что в этом случае

$$C=C_0\left(1+\frac{L}{CR_x^2}\right)=C_0\left(1+\frac{L\omega}{R_x}\operatorname{tg}\delta\right).$$

При наличии потерь в датчике максимум силы тока в контуре достигается, следовательно, при значениях емкости, больших, чем при отсутствии потерь, а емкость, соответствующая резонансу, возрастает с ростом потерь в датчике. При этом максимум резонансных кривых становится расплывчатым; определение резонанса становится неточным. Рассмотренная схема применялась лишь в первых влагомерах для измерения невысокой влажности материала без электролитических примесей.

б) Определение резонанса по максимуму напряжения на конденсаторе. Напряжение на датчике, измеряемое вольтметром, равно:

$$\dot{U}_x=\frac{\dot{E}}{(1-\omega^2LC)+j\dfrac{\omega L}{R_x}}. \qquad (4\text{-}3)$$

Условием резонанса является:

$$\omega=1/\sqrt{LC} \quad \text{или} \quad C=C_0.$$

Емкость, соответствующая резонансу, не зависит, следовательно, от потерь в контуре и равна емкости, соответствующей резонансу при отсутствии потерь. Резонансная частота также равна частоте ω_0 контура без потерь. На этом основано суждение некоторых исследователей о том, что способ измерения напряжения на конденсаторе в параллельном контуре свободен от влияния потерь в датчике; такое мнение неправильно. Как видно из (4-3), напряжение на контуре зависит от величины R_x.

Как и при определении резонанса по максимуму тока, с повышением влажности не только понижается максимальное значение U, но резонансная кривая становится более широкой, и ее максимум — более пологим, в связи

с чем понижается острота настройки в резонанс, а следовательно, и точность измерения.

Для диэлькометрических измерений влажности важно то, что резонансное напряжение параллельного контура и резонансный ток последовательного контура несут информацию о величине активных потерь в датчике. Напряжение на параллельном контуре с пустым датчиком в момент резонанса равно:

$$U_0 = I/G_к,$$

где I — сила тока в неразветвленной части контура; $G_к$ — активная проводимость контура.

Если вследствие введения в датчик влажного материала проводимость контура увеличится на ΔG, то новое значение резонансного напряжения будет (при постоянной силе тока I):

$$U = \frac{I}{G_к + \Delta G},$$

откуда

$$\Delta G = \frac{U_0 - U}{U} G_к. \qquad (4\text{-}4)$$

Аналогично для последовательного контура имеем (при U=const):

$$\Delta r = \frac{I_0 - I}{I}, \qquad (4\text{-}5)$$

где Δr — приращение последовательного сопротивления r контура; I_0, I — резонансный ток контура с пустым и заполненным датчиком.

Одной из разновидностей рассмотренного метода является способ «половины резонансной кривой». По этому способу для отсчета используется не максимум резонансной кривой, а наиболее крутой участок одной из ветвей этой кривой. Параметры колебательного контура выбираются таким образом, чтобы его резонансная частота несколько отличалась от частоты генератора, а изменения силы тока или напряжения в контуре, соответствующие пределам измерения, находились на крутом участке резонансной кривой. Выходной величиной схемы является сила тока или, чаще всего, напряжение. При измерениях влажности емкостным датчиком вследствие наличия потерь в материале рабочая точка перемещается не по одной, а по разным резонансным кривым, соответствую-

щим различным величинам диэлектрических потерь в датчике.

Выходная величина является функцией обеих составляющих полного сопротивления датчика. Измерение основано на принципе прямого преобразования, и так как амплитуды напряжения или тока в контуре зависят от напряжения питания, необходимо стабилизировать величину этого напряжения. Для уменьшения влияния колебаний напряжения питания и получения более равномерной шкалы влагомера в электронном вольтметре, измеряющем напряжение на контуре, применяются отрицательная обратная связь, автоматическое сеточное смещение и другие известные способы.

Схемы, основанные на способе «половины резонансной кривой», широко применялись в автоматических и неавтоматических влагомерах.

Из резонансных измерительных схем, основанных на принципах частотной модуляции, наиболее просты схемы, в которых выходной величиной служат постоянная составляющая анодного (I_a) или сеточного (I_c) тока автогенератора; известно, что увеличению I_a соответствует уменьшение I_c. Датчик входит в колебательный контур в анодной или сеточной цепи или в контур, связанный с ним электрической или магнитной (чаще всго индуктивной) связью.

Изменение параметров материала (ε и $\operatorname{tg}\delta$) влечет за собой изменение эквивалентного сопротивления $Z_э$ колебательного контура. Если генератор работает в перенапряженном или близком к нему режиме, характеризующемся большим сеточным током, изменения $Z_э$ влекут за собой значительные изменения анодного и сеточного токов, являющиеся функцией полного сопротивления датчика. Схемы этого типа обладают невысокой точностью, так как изменения напряжения питания и характеристик ламп, входящих в схему автогенератора, вызывают прямые ошибки измерения. Однако благодаря своей простоте (возможность реализации с помощью одной лампы) они находят применение в лабораторных и особенно переносных приборах, например в малогабаритном влагомере для зерна (рис. 4-6) [Л. 4-9].

Датчик C_x включен в колебательный контур генератора, собранного на транзисторе. Потенциометр R позволяет настроить схему на максимальное показание прибора $П$ при незаполненном датчике; с ростом влажности

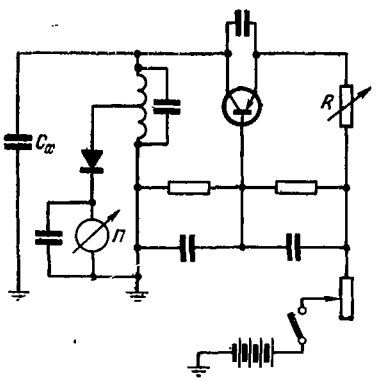


Рис. 4-6. Принципиальная схема диэлькометрического влагомера для зерна.

увеличивается величина $Z_э$, а сила тока, измеряемая прибором $П$, уменьшается.

Как уже отмечалось, включение датчика во вторичный контур, слабо связанный с колебательным («метод реакции»), позволяет уменьшить влияние потерь в датчике. В частном случае, когда индуктивно связанный вторичный контур при измерениях настраивают в резонанс с частотой генератора, вносимое в контур генератора сопротивление имеет максимальное значение и чисто активный характер. Полное сопротивление вторичного контура $Z_к = R_к$ ($R_к$ — активная составляющая $Z_к$) и вносимое сопротивление в соответствии с формулой (4-2) $Z = \omega^2 M^2 / R_к$, где M — взаимная индуктивность обоих контуров. В этих условиях схема измеряет активную составляющую сопротивления датчика.

От недостатков схем с измерением сеточного или анодного тока в значительной мере свободны схемы срыва колебаний.

Их основной частью является генератор — транзисторный или чаще ламповый.

Во влагомерах наибольшее применение нашли осцилляторные схемы, в которых кварцевый резонатор работает вблизи своей частоты параллельного резонанса и может рассматриваться как индуктивность высокой добротности. Обычно кварцевый резонатор включается в сеточную цепь, в результате чего образуется сеточный колебательный контур, связанный с анодным колебательным контуром через междуэлектродную емкость.

Для обеспечения условий самовозбуждения в такой схеме необходимо, чтобы сопротивление анодного контура носило индуктивный характер. При этом амплитуда генерируемых колебаний максимальна, а постоянная составляющая анодного тока минимальна. Датчик включен в анодный колебательный контур и при постепенном уве-

личении его емкости (уменьшении частоты) анодный и сеточный токи изменяются так, как это показывают графики рис. 4-7.

Срыву колебаний соответствует скачок тока — участки *АБ* и *А′Б′* кривых $I_a(C)$ и $I_c(C)$, где незначительные изменения емкости вызывают резкие изменения токов. Использование этих участков для отсчета позволяет измерять весьма малые емкости. Достоинством схемы являются ее простота, высокая чувствительность к изменениям емкости, независимость результата измерения от колебаний напряжения источника питания, удобство фиксирования резонанса по показаниям стрелочного прибора в анодной или сеточной цепи.

Дальнейшее усовершенствование и упрощение схемы срыва колебаний были достигнуты использованием в ней электронного индикатора настройки — лампы 6Е5С; такая схема применена во влагомере конструкции автора (влагомер ВЭБ). Триодная часть лампы используется в качестве кварцевого генератора с кварцевым резонатором между катодом и сеткой. Между анодом и экраном лампы 6Е5С последовательно с контуром включено большое сопротивление. При резком уменьшении анодного тока в момент возникновения колебаний падение напряжения на сопротивлении между управляющим электродом и экраном уменьшается и теневой сектор резко сокращается. Закрытие теневого сектора используется для фиксации момента отсчета емкости переменного конденсатора по методу замещения. Визуальный индикатор освобождает от необходимости в электроизмерительном приборе и упрощает схему влагомера.

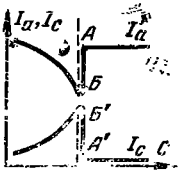


Рис. 4-7. Зависимость анодного (I_a) и сеточного (I_c) токов от емкости колебательного контура.

Схема срыва колебаний с электроннолучевым индикатором была применена и в других влагомерах; ее можно осуществить также на ламповом генераторе с кварцевым резонатором между анодом и сеткой.

Условия самовозбуждения выполняются в этом варианте схемы при емкостном характере сопротивления

анодного контура, т. е. если его резонансная частота ниже частоты параллельного резонанса кварца.

Схемы с частотным детектором основаны на прямом методе частотной модуляции; емкостный датчик включен в колебательный контур генератора и непосредственно изменяет частоту колебаний этого генератора. Индикатором изменения частоты служит частотный детектор, который дает на выходе напряжение, величина которого зависит от величины ухода частоты от основной частоты ω_0, а знак зависит от знака ухода. Известен ряд схем детекторов, нашедших применение для измерения

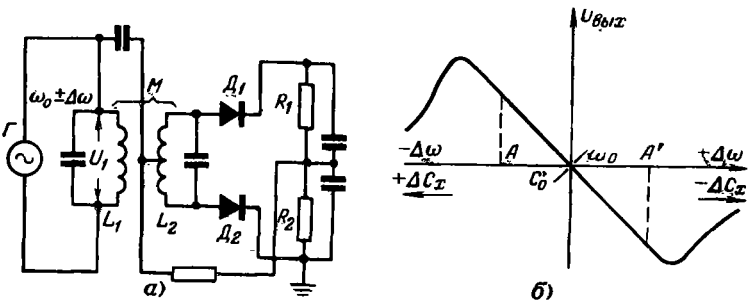


Рис. 4-8. Принципиальная схема и основная характеристика частотного детектора.

малых емкостей. Наибольший интерес представляют двухтактные схемы, в частности дифференциальная схема с колебательной системой в виде двух одинаковых связанных контуров, настроенных на основную частоту ω_0. Принципиальная схема детектора приведена на рис. 4-8,*а*.

Зависимость напряжения на выходе детектора, т. е. разности двух выпрямленных напряжений, выделенных диодами $Д_1$ и $Д_2$ на сопротивлениях R_1 и R_2, от расстройки частоты показана на рис. 4-8,*б*; этот график представляет собой основную характеристику частотного детектора. Для измерения емкости используют изменения частоты, соответствующие линейному участку AA' характеристики $U_{вых}(\Delta\omega)$. Кроме линейности, эта характеристика обладает свойством, ценным для автоматизации измерения: знак напряжения совпадает со знаком отклонения частоты от ω_0; отсутствию отклонения соответствует $U_{вых}=0$. Необходимо сохранение постоянства основной

частоты генератора, достигаемое стабилизацией напряжения питания генератора и другими известными способами стабилизации частоты. Для устранения зависимости напряжения U_1 от расстройки в рассмотренной схеме обычно применяется амплитудное ограничение. Чувствительность схемы к изменениям емкости датчика определяется крутизной характеристики детектора; она повышается с ростом резонансной частоты и зависит от степени связи и добротности контуров. С повышением крутизны кривой $U_{вых}(\Delta\omega)$ одновременно сужается диапазон $\Delta\omega$, соответствующий линейному участку характеристики.

Достоинством схем этого типа является их относительная простота (наличие одного генератора), удобная для измерения выходная величина и высокая чувствительность; они позволяют обнаруживать уход частоты величиной несколько герц или даже доли герца. Чувствительность схемы в целом может достигать (при малых потерях в датчиках) десятков вольт на 1 *пф*.

Благодаря указанным преимуществам схемы с частотными детекторами широко распространены во влагомерах, особенно автоматических.

Метод биений обычно считают наиболее чувствительным и точным из резонансных методов измерения частот, малых емкостей и индуктивностей; в этом методе принцип сравнения осуществляется не в контуре, содержащем датчик, а в самой измерительной схеме, преобразующей изменения емкости в частоту биений.

В применении к измерениям с емкостными или индуктивными датчиками метод основан на сравнении частот колебаний двух генераторов (обычно в среднем диапазоне частот — до 5 — 10 *Мгц*). Один генератор имеет постоянную частоту, а у второго частота зависит от параметров датчика, включенного в анодный или сеточный контур. Измерительная схема по методу биений состоит из опорного генератора, работающего на фиксированной частоте f_1; измерительного генератора с частотой f_2, изменяющейся в функции измеряемого параметра; смесителя, в котором образуются результирующие колебания (биения) с частотой, равной разности частот обоих генераторов $\Delta f = f_1 - f_2$, и индикатора частоты биений. Измерения производятся путем определения величины частоты биений или, чаще всего, методом нулевых биений, т. е. по методу уравновешивания в контуре с датчиком до

достижения равенства частот обоих генераторов ($\Delta f = 0$). Относительная погрешность измерения емкости без потерь равна удвоенной погрешности определения частоты: $dC/C = -2df/f$.

Так как при высокой частоте величина df/f весьма мала, чувствительность метода очень высока, а относительная погрешность в принципе может быть доведена до тысячных долей процента. Практически точность схем по методу биений ограничена рядом факторов: точностью отдельных элементов схемы, т. е. устойчивостью частот обоих генераторов, погрешностями смесителя, чувствительностью и точностью индикаторного устройства, а также явлением захватывания частот. При измерениях влажности точность и чувствительность измерения дополнительно уменьшаются в результате влияния потерь в исследуемом материале; как и в других резонансных схемах, измерение возможно только до определенной минимальной величины потерь, при которой срываются колебания измерительного автогенератора.

Известен ряд способов повышения точности метода биений. Эти способы усложняют измерительную схему (и без этого более сложную, чем в других резонансных методах), и их применение оправдано лишь в тех случаях, когда необходима очень высокая точность измерения. В влагомерах, как правило, достаточно применение схемы биений в ее наиболее простом выполнении. Измерительные схемы, примененные на практике, отличаются лишь отдельными узлами, в частности способом индикации биений, в значительной мере определяющим свойства влагомера.

Обобщенные схемы измерительного устройства влагомера на принципе биений показаны на рис. 4-9. Неавтоматическому влагомеру соответствует часть схемы в пунктирном прямоугольнике. Индикатором в схемах с уравновешиванием может служить электроннолучевой индикатор (звуковые индикаторы не применяются в современных влагомерах). В схемах прямого преобразования частоту биений измеряют частотомером со стрелочным указателем на принципе заряда и разряда конденсатора. Для устранения влияния изменений измеряемого напряжения и напряжений других частот, кроме частоты биений, напряжение смесителя подается на усилитель, а затем на ограничительно-формирующее устройство. Реже применяются другие способы измерения частоты

биений, например счет числа импульсов, поступивших на счетное устройство через электронный ключ, отпираемый на определенный интервал времени.

Автоматические влагомеры имеют измерительную схему (полная схема рис. 4-9), отличительной особенностью которой является детектор частоты биений, представляющий собой аналоговый преобразователь частота — напряжение постоянного тока; величина этого напряжения определяется величиной частоты биений, а знак — знаком

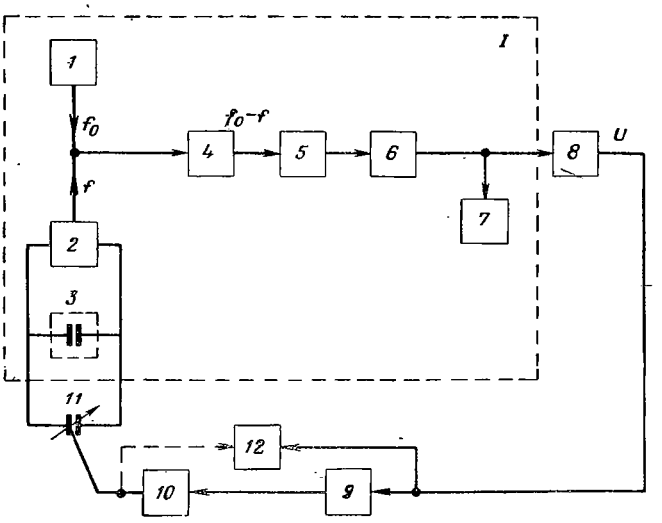


Рис. 4-9. Блок-схема влагомеров на принципе биений.

I — схема неавтоматического влагомера; *1* — опорный генератор; *2* — измерительный генератор; *3* — датчик; *4* — смеситель; *5* — фильтр низкой частоты; *6* — усилитель низкой частоты; *7* — индикатор неавтоматического влагомера; *8* — преобразователь «частота — напряжение»; *9* — следящая система; *10* — реверсивный двигатель; *11* — уравновешивающий переменный конденсатор; *12* — индикатор автоматического влагомера.

отклонения частоты рабочего генератора от опорной частоты. В измерительных устройствах на принципе прямого преобразования индикатор (показывающий и самопишущий прибор) подключается к выходу преобразователя.

В схемах с автоматическим уравновешиванием выходное напряжение U преобразователя используется для управления следящей системой, изменяющей емкость

уравновешивающего конденсатора в колебательном контуре до достижения нулевых биений, которым соответствует $U=0$.

Схемы основанные на измерении полного сопротивления датчика в электрических цепях без использования явления резонанса, можно разделить на мостовые, дифференциальные и схемы сравнения напряжений.

Во влагомерах с измерительной схемой без разделения составляющих нашли применение некоторые упрощенные модификации мостов переменного тока, не требующие уравновешивания по двум параметрам.

Первую группу образуют схемы с неуравновешенными четырехплечими мостами, в которых выходной величиной является выпрямленный ток (или напряжение) измерительной диагонали моста.

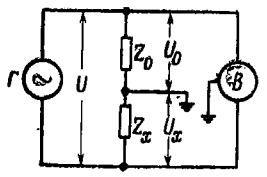


Рис. 4-10. Дифференциальная измерительная схема.

Ко второй группе относятся мостовые схемы, у которых одно или два плеча образованы ламповыми генераторами; колебательный контур одного генератора содержит емкостный или индуктивный датчик, который изменяет сопротивление лампового генератора в цепи постоянного тока. Известно, что в триодном ламповом генераторе первая гармоника анодного тока и его постоянная составляющая являются функциями полного эквивалентного сопротивления колебательного контура $Z_э$; следовательно, ток в диагонали рассматриваемого моста также изменяется в зависимости от величины $Z_э$.

К этой же категории можно отнести измерительные устройства, состоящие из двух одинаковых генерирующих триодов (обычно двух половин двойного триода), у которых сеточные контуры связаны общим резистором; один из контуров содержит емкостный датчик, второй — переменные конденсаторы для уравновешивания и настройки схемы. При равенстве частот обоих контуров (обычно 2—5 *Мгц*) мостовая схема, образованная внутренними сопротивлениями обоих триодов и их сопротивлениями нагрузки (анодными или катодными), уравновешена и напряжение выходной цепи моста между анодами или катодами триодов равно нулю. Изменение пол-

ного сопротивления датчика влечет за собой появление тока в указанной цепи.

Схемы дифференциальные и сравнения напряжений основаны на сравнении напряжений двух цепей (рис. 4-10), одна из которых содержит полное сопротивление датчика Z_x, а вторая — образцовое сопротивление Z_0, которое может состоять из любой комбинации реактивных и активных сопротивлений. Напряжение питания U обеих цепей дает общий источник — генератор $Г$ повышенной частоты. В простейшем случае применяется емкостный делитель, в котором плечо Z_0 образовано конденсатором постоянной емкости.

В дифференциальных схемах вольтметр B (обычно дифференциальный) измеряет разность падений напряжения на обоих плечах делителя:

$$\dot{U}_x - \dot{U}_0 = \dot{U}\frac{Z_x - Z_0}{Z_x + Z_0}.$$

В схемах сравнения напряжения измеряется падение напряжения на одном из плеч делителя:

$$\dot{U}_x = \frac{\dot{U}}{1 + \frac{Z_0}{Z_x}} \quad \text{или} \quad \dot{U}_0 = \frac{\dot{U}}{1 + \frac{Z_x}{Z_0}}.$$

Напряжения $\dot{U}_x$ и $\dot{U}_0$ можно измерять фазочувствительными вольтметрами, причем напряжение питания делителя U используется в качестве опорного. Чаще всего измеряются модули напряжений $|\dot{U}_x|$ и $|\dot{U}_0|$ или их разность.

Точность измерения определяется: а) стабильностью напряжения U и (в меньшей степени) частоты генератора; б) устойчивостью образцового сопротивления Z_0; в) погрешностью измерения напряжения вольтметром B.

Многочисленные влагомеры по дифференциальной схеме работают чаще всего при частотах в несколько мегагерц; в них используются электронные ламповые или полупроводниковые генераторы. Дифференциальная схема нашла применение также в ряде автоматических влагомеров, причем используются ее положительные качества — возможности компенсации температурной и других погрешностей в опорной ветви, а также использования в качестве выходного прибора электронного автоматического потенциометра.

По схемам сравнения или дифференциальной легко выполнить влагомеры, имеющие нулевую отметку в середине шкалы и показывающие величину и знак отклонения влажности от номинального (установленного) значения. Такие приборы находят применение для разбраковки материалов по влажности, а также в автоматических системах, если не требуется информация об абсолютных значениях влажности.

Измерительные устройства с разделением составляющих полного сопротивления датчика. Необходимость измерения активной и реактивной составляющих комплексного сопротивления Z_x датчика возникает лишь при исследовании зависимости электрических параметров (ε', ε'') материала от его влажности и других влияющих факторов. Для измерения модуля и фазового угла комплексного сопротивления применяются мосты и компенсаторы, осциллографические схемы, куметры и т. д., подробно описанные в литературе (см., например, [Л. 4-10 и 4-11]). В диэлькометрических влагомерах рассматриваемой категории решается задача измерения лишь одной составляющей полного сопротивления, причем эта задача имеет ряд особенностей. Переменными являются обе составляющие, и относительное изменение второй (неизмеряемой) составляющей велико, иногда даже больше изменения измеряемой величины. Комплексные сопротивления датчиков влагомеров отличаются от объектов радиотехнических измерений малыми величинами емкости и большими углами диэлектрических потерь; измерения проводятся только при повышенных частотах.

Как уже отмечалось, для влагомеров требуется несложная аппаратура с простой техникой измерения. Из сказанного следует, что для влагомеров необходимы специализированные измерительные устройства узкого назначения. Ниже описываются измерительные схемы только этого типа.

Устройства для измерения активной составляющей полного сопротивления датчика мало распространены.

Диэлькометрические влагомеры, измеряющие только активную составляющую, имеют характеристики, аналогичные кондуктометрическим; к их достоинствам относится высокая чувствительность в диапазоне низких влагосодержаний, причем отпадают затруднения, встречаю

щиеся в кондуктометрическом методе и связанные с измерением очень больших омических сопротивлений датчика. Прибор [Л. 4-12], предназначенный для нитрата аммония с влажностью в пределах 0,05—0,3%, основан на измерении амплитуды максимального напряжения параллельного колебательного контура, в который входит индуктивный датчик (отрезок стеклянной трубки, на внешней поверхности которой намотана катушка индуктивности). Контур питает ламповый генератор с частотой 2 *Мгц*, у которого автоматически стабилизируется выходное напряжение. Параллельно датчику в контур включен дифференциальный переменный конденсатор, ротор которого непрерывно приводится во вращение синхронным электродвигателем. Колебательный контур периодически (с частотой 5 *гц*) проходит через резонанс; выходные импульсы поступают на пиковый вольтметр, шкала которого градуирована в процентах влажности.

Устройства для измерения реактивной (емкостной) составляющей основаны на разных методах.

Мосты и компенсаторы с уравновешиванием двумя параметрами представляют собой сложные дорогие приборы и не применяются во влагомерах, работающих на высоких частотах.

Из известных мостовых схем для диэлькометрических влагомеров представляют интерес две разновидности, свободные от некоторых недостатков обычных четырехплечих мостов: Т-образные и с индуктивно связанными плечами. Т-образные мосты состоят из Т-образных четырехполюсников; если элементы схемы находятся в определенных соотношениях, указатель отмечает равновесие. Имеются Т-образные мосты, позволяющие измерять сопротивление любого характера и, в частности, определять независимо друг от друга активную и реактивную составляющие полного сопротивления датчика. При этом благодаря наличию общей точки между входной и выходной цепями по сравнению с обычными мостами сильно упрощаются экранирование и заземление элементов схемы. Обычно можно заземлить измеряемое полное сопротивление, источник питания и указатель равновесия. Последнее обстоятельство освобождает от применения экранированных трансформаторов на входе и выходе моста, что особенно ценно при измерениях на высокой частоте. Т-образные мосты до последнего времени не применялись во влагомерах промышленного типа.

Мосты с тесной индуктивной связью плеч имеют близкий к единице коэффициент связи между обмотками, образующими индуктивные плечи. Это достигается размещением их на общем сердечнике из материала с высокой магнитной проницаемостью и малыми потерями (например, феррита). Главным достоинством таких мостов является ничтожно малое влияние паразитных проводимостей, шунтирующих элементы мостовой схемы.

Из различных известных мостовых схем с индуктивно связанными плечами рассмотрим схему шестиплечего моста для измерения емкостной составляющей комплекс-

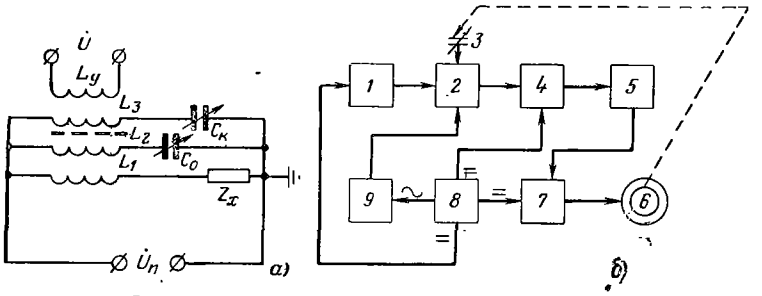


Рис. 4-11. Схемы моста с индуктивно связанными плечами (*а*) и автоматического влагомера (*б*).

1 — генератор высокой частоты; *2* — мостовая схема; *3* — уравновешивающий конденсатор; *4* — усилитель высокой частоты; *5* — амплитудный детектор; *6* — реверсивный двигатель; *7* — усилитель низкой частоты; *8* — блок питания; *9* — модулятор.

ного сопротивления Z_x датчика, примененную во влагомерах, разработанных Институтом автоматики АН Киргизской ССР (рис. 4-11,*а*) [Л. 4-13,*а*].

Плечи моста образованы полным сопротивлением датчика Z_x, емкостями — образцовой C_0 (измерительный конденсатор) и переменной C_k, а также уложенными на ферритовом кольце обмотками L_1, L_2 (плечи отношения) и L_3; емкость C_k совместно с индуктивностью L_3 используется для настройки влагомера.

Напряжение питания $\dot{U}_п$ подается на диагональ моста, а выходное напряжение $\dot{U}_{вых}$ снимается с обмотки $L_у$. Для уравновешивания моста в схеме влагомера предусмотрены модуляция емкости и амплитудное детектирование.

Выходное напряжение разбаланса моста $\dot{U}_{вых}$, модулированное частотой 50 *гц*, детектируется амплитудным детектором. Выделенная детектором модуляционная огибающая $\dot{U}_{вых}$ поступает на фазовый детектор, опорное напряжение которого синфазно с модуляционным воздействием (опорное напряжение фазового детектора и управляющее напряжение модулятора поступают с трансформатора питания). В этих условиях изменения активной составляющей комплексного сопротивления датчика практически не оказывают влияния на равновесие моста; влияние этой составляющей ограничивается лишь изменением чувствительности схемы при измерении реактивной составляющей.

Описанные схемы использованы в лабораторном и автоматическом влагомерах. В первом имеется стрелочный указатель равновесия моста; модулятором служит транзисторный ключ, периодически подключающий постоянную емкость параллельно измерительному конденсатору.

У аналогового автоматического влагомера [Л. 4-13б] (рис. 4-11,*б*) выделенная амплитудным детектором огибающая напряжения разбаланса моста после усиления используется в качестве сигнала управления реверсивным асинхронным двухфазным двигателем. Двигатель вращает ротор конденсатора переменной емкости, уравновешивающего мостовую схему.

Большим практическим достоинством рассмотренных схем является возможность отнесения датчика на значительное расстояние от прибора и минимизация влияния параметров соединительного кабеля на результаты измерения. Это достигается трехточечной схемой включения датчика в мост. К недостаткам следует отнести ограниченность верхнего предела рабочей частоты; в описанных влагомерах она равна 110 *кгц*.

Вторая группа измерительных устройств основана на рассмотренных в первой части этого параграфа схемах, в которых дополнительно предусмотрены те или иные способы компенсации активной составляющей полного сопротивления. П. М. Плакк [Л. 4-14] использовал двухполюсник, состоящий из последовательно включенных индуктивности L и емкости C, шунтированной активным сопротивлением R. Если реактивные элементы связаны соотношением $\omega^2LC=1/2$, то модуль полного сопротивления $-(Z=1/2\omega C=\omega L)$ не зависит от

величины сопротивления R. Измерение емкости сводится к применению схемы сравнения двух напряжений — на индуктивности L и на двухполюснике в целом. Этот способ применялся для измерения влажности материалов с большими потерями, например торфа.

Более распространены резонансные схемы на принципе замещения, у которых в измерительный резонансный контур вводятся переменные активные сопротивления, позволяющие уравновесить активную составляющую измеряемого полного сопротивления. Контур настраивается в резонанс с введенным датчиком, который затем замещают переменным образцовым конденсатором и переменным активным сопротивлением. Этот способ в различных видоизменениях применяется во многих резонансных схемах. Для введения потерь в колебательный контур необходимы практически безреактивные (безъемкостные и безындуктивные) переменные сопротивления, активное сопротивление которых не зависит от частоты (в пределах ее изменений в схеме). Такие сопротивления достаточно трудно осуществить. Одно из простейших решений этой задачи заключается в использовании диода с катодной нагрузкой (переменный резистор r, шунтированный емкостью). Такую схему можно применять для частот до 100 *Мгц* и выше. Ее активное сопротивление является функцией переменного сопротивления r. Развитием описанного метода является схема, основанная на низкочастотной (чаще всего частотой 50 *гц*) модуляции параметров, например емкости измерительного параллельного колебательного контура, питаемого током фиксированной частоты. При настройке контура в резонанс модуль его полной проводимости принимает постоянное значение, а выходное напряжение становится равным нулю. Так как условие резонанса не зависит от активного сопротивления датчика, методом замещения можно определить его «чистую» емкость по изменению параметров уравновешивающего элемента.

Указанный способ был реализован Л. В. Каменевым [Л. 4-15] в схемах с автоматическим уравновешиванием. Демодулированный низкочастотный выходной сигнал контура управляет фазочувствительной следящей системой, приводящей контур в состояние резонанса. В первом варианте схемы исполнительный электродвигатель следящей системы управляет конденсатором переменной емкости, включенным в контур параллельно датчику. Во

второй схеме уравновешивающим элементом, включенным параллельно контуру, служит цепь, состоящая из последовательно соединенных сопротивления R термистора и постоянной емкости C. Эквивалентная емкость этой цепи $C_э = C/(1+\omega^2C^2R^2)$ изменяется в функции силы тока, нагревающего термистор, т. е. выходного тока следящей системы. На этом принципе основан автоматический диэлькометр [Л. 4-15] с рабочей частотой 1,25 *Мгц*.

Уравновешивающую электрическую цепь удобно пристроить непосредственно к датчику, благодаря чему его можно отнести на значительное расстояние от измерительного устройства без введения погрешностей от изменений электрических параметров соединительного кабеля.

Упрощенный способ учета активной составляющей полного сопротивления датчика заключается во введении в результат измерения полной проводимости поправки по другой величине, функционально связанной с потерями в датчике. В резонансных схемах такую коррекцию проще всего выполнить по величине напряжения на колебательном контуре [см. формулу (4-4)].

Измерительная схема влагомера для песка [Л. 4-16] основана на принципе срыва колебаний лампового генератора, частота которого стабилизирована кварцевым резонатором. Для компенсации потерь в датчике напряжение на контуре, содержащем датчик, измеряется ламповым вольтметром. Выходным прибором вольтметра является магнитоэлектрический микроамперметр, преобразующий изменение силы тока в изменение емкости конденсатора, образованного неподвижной пластиной и металлическим флажком, который связан с подвижной системой прибора. При уменьшении добротности контура компенсатор изменяет емкость, вводимую в контур, и соответственно его собственную частоту.

В схеме влагомера [Л. 4-17] по методу биений ($f = 30$ *Мгц*) роль компенсирующего элемента выполняет варикап, включенный в колебательный контур параллельно датчику. Емкостью варикапа управляет выпрямленное напряжение контура.

4-3. ВЛАГОМЕРЫ СВЕРХВЫСОКИХ ЧАСТОТ

Измерения влажности твердых материалов и жидкостей на СВЧ являются разновидностью диэлькометрического метода, в которой изменения диэлектрических

свойств материала оцениваются по его взаимодействию с радиоволнами дециметрового, сантиметрового и миллиметрового диапазонов. Измерения свойств диэлектриков в полях сверхвысокой частоты выполняются уже с начала XX в. (метод Друде); некоторые методы (волноводные, с двухпроводными и коаксиальными линиями) использовались и в исследованиях влияния влажности диэлектриков (например, нефтей) на их электрические свойства. Однако переход от лабораторных установок к влагомерам СВЧ промышленного назначения относится к 50-м годам, когда появились влагомеры, основанные на измерениях в свободном пространстве; одним из первых был разработанный в СССР влагомер для древесины [Л. 4-18].

В последнем десятилетии применение влагомеров СВЧ в различных областях науки и техники непрерывно растет. Важнейшими достоинствами влагомеров СВЧ являются: возможность бесконтактных измерений (в свободном пространстве), высокая чувствительность, неограниченный верхний предел измерений, малое влияние на результаты измерений химического состава материала и некоторых других факторов (см. § 4-4).

При прохождении радиоволн СВЧ через влажный материал происходят поглощение и рассеяние энергии электромагнитных волн частицами вещества (влаги и сухого скелета). Для получения информации о свойствах вещества можно использовать параметры прошедшего или отраженного излучения. При этом конструкция и схема измерительного устройства определяются принятым способом локализации поля СВЧ в исследуемом материале.

Можно предложить следующую классификацию СВЧ методов измерения влажности:

1. Методы свободного пространства; а) с использованием проходящей волны; б) с использованием отраженной волны. В обеих модификациях измеряемой характеристикой могут служить затухание (модуль коэффициента передачи или коэффициента отражения), изменение амплитуды или фазы волны.
2. Резонаторные методы.
3. Волноводные методы.

Известны и некоторые другие методы, нашедшие пока весьма ограниченное практическое применение. К ним относятся методы зондовые, поверхностной волны, вращения плоскости поляризации.

Влагомеры, основанные на измерении в свободном пространстве затухания или фазового сдвига проходящей волны, нашли наибольшее практическое применение. Исследуемый материал помещается между передающей и приемной антеннами при нормальном падении волны. На практике обычно используются рупорные антенны, хотя возможно применение направленных излучателей и других типов, например диэлектрических стержневых антенн.

Зависимости, связывающие изменение амплитуды Δa или фазовый сдвиг $\Delta\varphi$ прошедшей волны с параметрами диэлектрика, можно вывести из волнового уравнения для нормального распространения плоской синусоидальной волны. При идеализации, соответствующей приближению геометрической оптики (без учета явлений отражения и дифракции), введение плоскопараллельного слоя диэлектрика толщиной L между источником и приемником излучения СВЧ вызывает изменение параметров прошедшей волны [Л. 4-19]:

$$\Delta a = \ln \frac{E(0)}{E(L)} = \int_0^L \alpha \, dl; \tag{4-6}$$

$$\Delta\varphi = \int_0^L \left[\beta(l) - \frac{2\pi}{\lambda}\right] dl, \tag{4-7}$$

где l — координата по направлению распространения волны; $E(0)$ и $E(L)$ — напряженность поля для $l=0$ и $l=L$; α, β — коэффициент затухания и фазовая постоянная, т. е. мнимая и вещественная составляющие волнового числа: $\beta+j\alpha=\gamma$.

Из формул (4-6) и (4-7) видно, что рассматриваемый метод дает интегральную (усредненную) оценку свойств материала на пути волны. Это — важное достоинство, так как для реальных материалов характерно неравномерное распределение влаги. У этих материалов закон изменения электрических параметров по координате l, как правило, неизвестен.

Выходной величиной преобразователей влагомеров СВЧ служит фазовый сдвиг $\Delta\varphi$ или ослабление (затухание) A в децибелах, вносимое материалом (суммарный эффект поглощения и отражения):

$$A = 10 \lg \frac{P_0}{P}, \tag{4-8}$$

где P_0 и P — мощности падающего и прошедшего излучения.

Величины $\Delta\varphi$ и A практически измеряют относительно воздуха, т. е. относительно значений, соответствующих отсутствию материала между антеннами.

Примем теперь упрощающее допущение об однородности исследуемого материала, определяющей независимость от координаты l вещественной и мнимой составляющих ε' и ε'' его комплексной диэлектрической проницаемости. В этих условиях выражения (4-6) и (4-7) принимают вид:

$$\Delta a = \alpha L \tag{4-9}$$

и

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi L}{\lambda}(\beta - 1). \tag{4-10}$$

Используем известные соотношения между коэффициентом затухания, фазовой постоянной и параметрами среды: ε'; $\operatorname{tg}\delta = \varepsilon''/\varepsilon'$ и магнитной проницаемостью μ:

$$\alpha = \frac{2\pi}{\lambda}\sqrt{\frac{\varepsilon'\mu}{2}\left(\sqrt{1+\operatorname{tg}^2\delta} - 1\right)}; \tag{4-11}$$

$$\beta = \frac{2\pi}{\lambda}\sqrt{\frac{\varepsilon'\mu}{2}\left(1+\sqrt{1+\operatorname{tg}^2\delta}\right)}, \tag{4-12}$$

Учитывая, что $A = 10\lg[\exp(\alpha L)]$, получаем:

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi L}{\lambda}\left[\sqrt{\frac{\varepsilon'\mu}{2}\left(1+\sqrt{1+\operatorname{tg}^2\delta}\right)} - 1\right]; \tag{4-13}$$

$$A = 19{,}36\,\frac{L}{\lambda}\sqrt{\varepsilon'\mu\left(\sqrt{1+\operatorname{tg}^2\delta} - 1\right)},\ дб. \tag{4-14}$$

Формулы (4-13) и (4-14) описывают связь между выходными величинами преобразователя влагомера и электрическими параметрами материала. Из-за допущений, принятых при их выводе, они являются приближенными и не могут использоваться, например, для градуировки влагомеров. В то же время они показывают, что результат измерения влагомером СВЧ (как по затуханию, так и по фазовому сдвигу) зависит не только от ε', но и от ε'' материала; пренебречь влиянием потерь можно лишь при условии $\operatorname{tg}^2\delta \ll 1$.

Рассмотрим теперь типовые схемы и устройство влагомеров данной категории. Лабораторный влагомер

(рис. 4-12) состоит из блоков передатчика и приемника и представляет собой устройство для измерения на фиксированной частоте затухания, вносимого в волноводный тракт образцом материала, который вводится в пространство между передающей и приемной рупорными антеннами. Измерение выполняется по методам прямого преобразования (отсчет по шкале показывающего прибора) или замещения (отсчет по шкале измерительного аттенюатора).

В качестве источника излучения используются чаще всего генераторы с отражательными клистронами малой

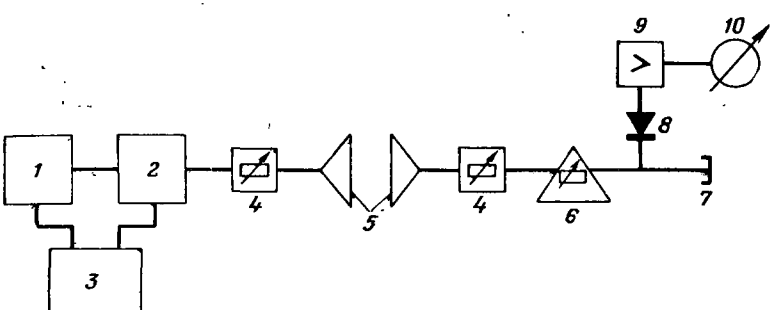


Рис. 4-12 Блок-схема неавтоматического влагомера СВЧ на принципе ослабления.

1 — генератор СВЧ; *2* — модулятор; *3* — блок питания; *4* — развязывающие аттенюаторы; *5* — антенны; *6* — измерительный аттенюатор; *7* — согласованная нагрузка; *8* — детектор; *9* — узкополосный усилитель; *10* — стрелочный прибор.

мощности (20—60 *мвт*). В последнее время находят применение также полупроводниковые генераторы, которые (при условии достаточной устойчивости) обладают некоторыми преимуществами, в частности более низким напряжением питания.

Развязывающие аттенюаторы уменьшают влияние на генератор сигнала, отраженного от объекта измерения (иногда для этого применяют ферритовые вентили). Кроме того, они используются для регулировки приемного устройства, например, для настройки нуля по принятому эталону (незаполненная кювета, образец материала абсолютно сухой или с постоянной влажностью и т. д.). В приемнике можно использовать усилители постоянного тока или супергетеродинные приемные устройства. Последние, осуществляя усиление на промежуточной частоте, усложняют схему влагомера (введение второго гете-

родинного генератора СВЧ). Их применение оправдано лишь в тех случаях, когда необходимо предельное повышение чувствительности приемника. Наиболее распространенным является использование модуляции колебаний СВЧ низкой частотой (от 50 *гц* до нескольких килогерц); обычно применяется модуляция импульсами типа меандр. При этом в приемном устройстве используется узкополосный усилитель низкой частоты, имеющий большой коэффициент усиления.

Пределы измерения зависят от мощности генератора, чувствительности приемного устройства и индикатора; в большинстве случаев они не превышают 40—50 *дб*.

Достоинством рассмотренной схемы является ее простота; как показывает анализ систематической погрешности измерения [Л. В-4], точность измерения можно повысить, применяя уравновешивающее преобразование с обратной связью.

Автоматические влагомеры строят чаще всего по двухканальным схемам сравнения с опорной волноводной ветвью или с использованием опорного электрического сигнала. В первом варианте [Л. 4-20] колебания СВЧ поступают к делителю энергии (волноводный тройник) и разветвляются по двум трактам — измерительному с передающей и приемной антеннами и исследуемым материалом и опорному, содержащему эталон влажности, которым может служить аттенюатор, настроенный на определенное значение влажности.

Во втором варианте опорный сигнал получают детектированием части падающей энергии СВЧ. В обоих вариантах можно обойтись одним детектором при наличии переключающего устройства, которое, однако, усложняет схему и используется в промышленных влагомерах сравнительно редко. Выходной сигнал (разность измерительного и опорного сигналов) поступает на вход следящей системы, управляющей уравновешивающим аттенюатором, с которым связан индикатор влагомера.

Указанные принципы применялись в различных модификациях влагомеров СВЧ, в частности в автоматическом влагомере, при проектировании которого были осуществлены некоторые элементы оптимизации [Л. 4-21]. Измерительное устройство выполнено по двухканальной схеме с обратной связью и идентичной модуляцией в обоих каналах. На ее выходе получают унифицированный выходной сигнал (0—10 *ма* постоянного тока), позволяю-

щий использовать влагомер не только в виде автономного устройства, но и в сочетании с Государственной системой приборов и средств автоматизации (ГСП). В качестве уравновешивающего органа использованы полупроводниковые аттенюаторы, построенные на коммутационных кремниевых диодах с *n-i-p-i-n*-структурой. У таких аттенюаторов можно плавно изменять затухание в определенных пределах путем изменения силы тока управления, которая служит выходным сигналом влагомера. Их преимуществами по сравнению с обычно применяемыми в влагомерах СВЧ аттенюаторами электромеханического типа являются высокая надежность вследствие отсутствия подвижных и изнашиваемых частей, высокое быстродействие (от 1 *нсек* до 50 *мксек*), большой срок службы, меньшие размеры, масса и стоимость.

Выбор рабочей частоты (λ=3,2 *см*) представляет собой компромиссное решение. Переход к более коротким волнам повышает чувствительность влагомера; однако при этом уменьшается площадь исследуемого образца и, следовательно, его представительность, увеличиваются сложность и стоимость аппаратуры. Использование более длинных волн ухудшает метрологические свойства влагомера (чувствительность, погрешность от изменений состава материала), увеличивает массу и габариты прибора.

Блок-схема влагомера приведена на рис. 4-13. Колебания СВЧ поступают от клистронного генератора *1* через ферритовые вентили *2*, *3* в передающую рупорную антенну *4*. После прохождения через объект измерения *5* и через антенну *6* они поступают в приемный волноводный тракт, содержащий уравновешивающий полупроводниковый аттенюатор *7* и детекторную секцию *8* для измерения прошедшей мощности. Опорный тракт содержит направленный ответвитель *9*, ферритовый вентиль *10*, подстроечный полупроводниковый аттенюатор *11* и детекторную секцию *12*. Измерительный и опорный сигналы подаются на вход дифференциального усилителя *13*, выходной ток которого управляет аттенюатором *7*. Цепь управления содержит выходное устройство *14*, дающее унифицированный сигнал *15*. На входы *16* поступают сигналы измерительных преобразователей параметров материала (температура, плотность), используемые для автоматической компенсации погрешностей от изменения этих параметров.

Автоматические влагомеры можно использовать для разнообразных твердых и жидких материалов, создавая непрерывный поток материала или периодически вводя его образцы в пространство между антеннами. Для этого применяются вспомогательные механические устройства, задачей которых является только фиксация положения материала относительно антенны (например, в случае контроля непрерывных движущихся лент листовых материалов) или, кроме того, стабилизация плот-

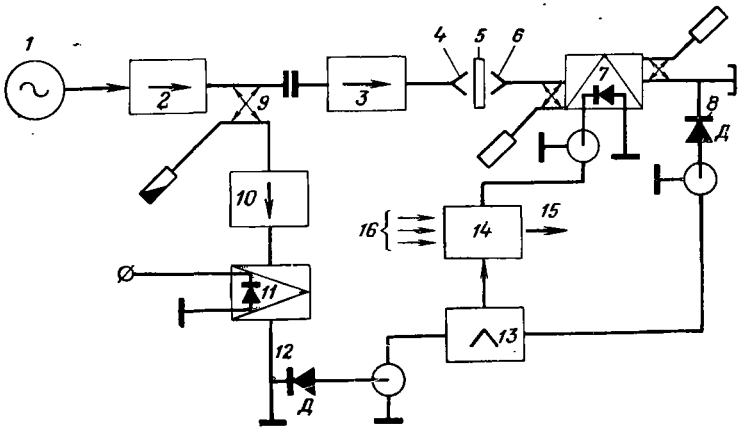


Рис. 4-13. Блок-схема автоматического влагомера СВЧ.

ности материала (сыпучие и другие дисперсные твердые материалы). Эти устройства не являются датчиками; отсутствие у них электродов существенно повышает надежность влагомеров СВЧ по сравнению с электровлагомерами других типов. При их разработке используются те же конструктивные принципы, что у вспомогательных устройств датчиков электровлагомеров (гл. 3).

Значительно меньшее применение нашли влагомеры на принципе измерения фазового сдвига $\Delta\varphi$ проходящей волны в свободном пространстве. Из многочисленных известных методов измерения $\Delta\varphi$ на СВЧ практически используются лишь наиболее простые — мостовые. Сигнал СВЧ, модулированный низкой частотой, разветвляется в два канала — измерительный, в котором радиоволна проходит через исследуемый материал, и опорный, содержащий калиброванный фазовращатель, позволяющий изменять фазу сигнала.

Выходные сигналы смешиваются в смесителе (волноводный тройник, направленный ответвитель и т. п.). Детектированный сигнал низкой частоты измеряется с помощью усилителя и индикатора.

С помощью фазовращателя определяют сдвиг фазы, необходимый для синфазирования сигналов в обоих каналах; кроме того, обычно имеется возможность определения (по методу замещения) затухания в объекте измерения при помощи переменного измерительного аттенюатора. Установка такого типа была применена для исследования характеристик фазового метода [Л. 4-22]. На аналогичном принципе основан СВЧ влагомер промышленного типа для раздельного измерения затухания и фазового сдвига на частоте 9,4 *Ггц*, разработанный и выпускаемый предприятием UNIPAN (ПНР) [Л. 4-23]. В схеме этого прибора сигнал, модулированный частотой 1 *кгц*, поступает только в ветвь, содержащую исследуемый материал, а ветвь с фазовращателем возбуждается непрерывным сигналом СВЧ.

Были предложены различные схемы автоматических фазовых влагомеров с использованием проходящей волны. В схеме с фазовым компаратором с двумя двойными тройниками и четырьмя детекторами [Л. 2-8] получают выходное напряжение, пропорциональное разности фаз измерительного и опорного каналов, без необходимости применения фазовращателя.

Компенсационная схема с двойным Т-образным мостом и уравновешивающим фазовращателем для измерения фазового сдвига на двух различных частотах предложена в [Л. 4-24].

Некоторые исследователи рассматривают фазовый сдвиг при измерениях влажности как источник искажения полезного (амплитудного) сигнала и принимают меры для подавления этой помехи. Такой подход был проявлен, например, при исследовании влажности древесины на волне 3,4 *см* [Л. 4-25]. В лабораторной установке одна из антенн могла перемещаться вдоль оптической оси, и перед каждым измерением расстояние между антеннами изменяли до получения максимального затухания.

Задача автоматической компенсации сигнала фазового сдвига для максимизации амплитудного сигнала решена в автоматическом влагомере UNIPAN [Л. 4-26] применением ферритового фазовращателя, двух модуля-

торов — амплитудного и фазового и двух фазовых детекторов, работающих при частотах 225 и 1 000 *гц*. Такое усложнение схемы влагомера, по нашему мнению, не оправдано, так как фазовый сигнал также содержит полезную информацию о влажности.

Многообещающим является, напротив, использование информации, содержащейся как в амплитудном, так и фазовом сигналах («двухпараметрическое измерение»).

В методе, основанном на отражении волны в свободном пространстве, также можно использовать амплитудные или фазовые измерения. Выходной величиной измерительного преобразователя является комплексный коэффициент отражения от исследуемого материала:

$$R = |R| e^{j\varphi}.$$

Преимуществом измерений по отражению по сравнению с измерениями по затуханию является одностороннее расположение приемопередающей системы СВЧ относительно объекта измерения. Считают также, что результат измерений по отражению не зависит от толщины образца. В действительности это справедливо лишь для таких толщин исследуемого образца, при которых волна полностью затухает, не выходя из материала, и, следовательно, исключается отражение от задней поверхности образца. В этих условиях и при нормальном падении волны модуль коэффициента отражения R по мощности, равный отношению отраженной мощности к падающей, связан с параметрами материала зависимостью

$$|R| = \frac{(1 - \sqrt{\varepsilon' - j\varepsilon''})^2}{(1 + \sqrt{\varepsilon' - j\varepsilon''})^2}.$$

При этом, однако, зондируются только поверхностные слои материала и невозможно получить информацию об его интегральной влажности. Если объектом измерения являются тонкие листовые материалы, не имеющие значительных градиентов влажности, поверхностная влажность достаточно точно характеризует среднюю влажность материала. Однако в этом случае (как и у других материалов при неполном затухании волны в их объеме) приходится учитывать многократные отражения от задней поверхности образца или от рас-

положенного за ней металлического зеркала, которое иногда применяют. Выходной сигнал несет информацию об интегральной влажности материала, но зависит от его толщины.

В обоих рассмотренных случаях, особенно при амплитудных измерениях, на результат измерения влияют состояние и характер (неровность) отражающих поверхностей: этот и указанные ранее недостатки ограничивают применение метода отраженной волны.

Метод отражения реализуется практически следующими способами. При малых потерях в материале (область очень низких влагосодержаний) нашел некоторое применение оптический метод угла Брюстера, заключающийся в нахождении угла падения, которому соответствует минимум отражения поляризованной электромагнитной волны (параллельная поляризация, при которой вектор электрического поля параллелен плоскости падения) от плоской поверхности образца.

При потерях, близких к нулю, для угла Брюстера $\varphi_Б$ имеет место соотношение

$$\varepsilon' = \mathrm{tg}^2 \varphi_Б.$$

В методе отражения можно использовать наклонное или нормальное падение волны. Предпочтение обычно отдают нормальному падению, при котором используется одна приемопередающая антенна, в то время как для наклонного падения применяются измерительные устройства, основанные на оценке параметров стоячей волны, возникающей в результате суперпозиции падающей и отраженной волн. Для приема отраженной волны одной совмещенной антенной можно использовать в волноводном тракте направленный ответвитель или двойной тройник, позволяющие получить более высокий уровень сигнала и лучшую развязку генератора СВЧ от тракта.

На рис. 4-14 приведена мостовая схема автоматического влагомера на принципе отражения с двойным волноводным тройником. Генератор СВЧ *1* присоединен к *H*-плечу, детектор — к *E*-плечу двойного тройника *2*. Одно из боковых плеч имеет рупорную антенну *3*, направленную на поверхность исследуемого материала *4*. Второе плечо (опорное) содержит эталон *5* (образец материала с постоянной влажностью, согласованная нагрузка). При равенстве модулей и фаз коэффициентов отражения R_x материала и $R_э$ эталона напряженности

отраженных волн в E-плече равны и находятся в противофазе; показания прибора *6*, подключенного через усилитель *7* к детектору *8*, равны нулю.

Если эталон идеально согласован ($R_э=0$), а характеристика детектора квадратична, показания индикатора приблизительно пропорциональны R_x. Для нагрузки, не полностью поглощающей ($R_э\neq 0$), максимальное и минимальное значения мощности на детекторе будут равны:

$$P=\frac{1}{4}(|R_э|\pm|R_x|)^2.$$

С целью уменьшения погрешностей от рассогласования генератора и детектора с плечами тройника в его ветви вводят вентили или развязывающие аттенюаторы.

Следует отметить далее, что в качестве влагомеров на принципе отражения можно применить рефлектомет-

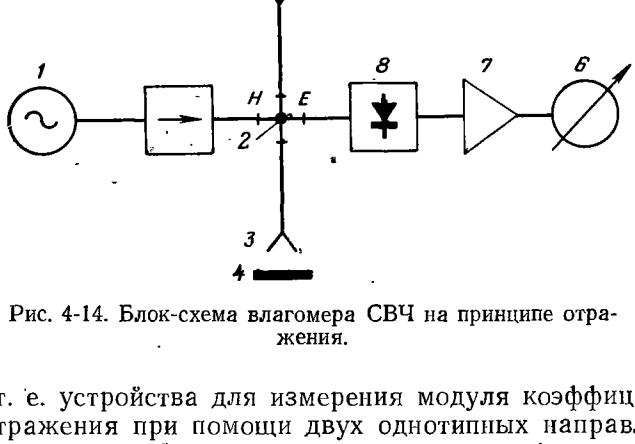


Рис. 4-14. Блок-схема влагомера СВЧ на принципе отражения.

ры, т. е. устройства для измерения модуля коэффициента отражения при помощи двух однотипных направленных ответвителей, расположенных таким образом, что их выходные детекторы измеряют соответственно напряженности поля отраженной и падающей волн. Дополнив рефлектометр фазовым детектором, можно измерить также фазу коэффициента отражения исследуемого материала [Л. 4-27].

Резонаторный и волноводный методы в своих модификациях, применяемых для исследования диэлектриков [Л. 2-15], требуют введения исследуемого

материала в полость волновода или резонатора, т. е. накладывают ограничения на размеры образца и по существу не являются бесконтактными в механическом смысле. В то же время локализация поля в полости повышает чувствительность влагомера и создает возможность измерения при низких влагосодержаниях и малой массе образца.

В *резонаторном методе* выходными величинами первичного преобразователя служат вызванные введением исследуемого материала изменения параметров резонатора: резонансной частоты $\Delta f = f - f_0$ и добротности $\Delta Q = Q - Q_0$ [f_0 и Q_0 — значения собственных (ненагруженных) параметров резонатора]. Для вычисления электрических свойств материала по параметрам резонатора необходимо знать картину поля, соответствующую принятому типу колебаний в используемом резонаторе.

Применение во влагомерах хорошо разработанной техники резонаторных методов исследования диэлектриков встречает следующие препятствия:

а) необходимость введения в резонансную полость небольшого образца строго определенных размеров и формы исключает возможность непрерывных измерений и сильно усложняет дискретные измерения;

б) используемые измерительные схемы, рассчитанные на раздельное определение ε' и ε'', непригодны или слишком сложны для влагомеров (особенно автоматических); дополнительные затруднения обусловлены увеличением пологости и ширины резонансных кривых с ростом влажности.

Применение резонаторов обычной формы — цилиндрических или коаксиальных — с введением образцов твердого материала или жидкостей определенного объема ограничено лабораторными измерениями влажности. В цилиндрические резонаторы с колебаниями типа E_{010} образец вводится вдоль его оси в виде цилиндрического стержня малого диаметра. Цилиндрический резонатор, возбуждаемый на волне типа H_{01}, позволяет исследовать образцы большего диаметра и с большими потерями, имеющие форму цилиндров, катушек, пучков нитей и т. п., устанавливаемых вдоль оси резонатора, или тонких плоских дисков, расположенных перпендикулярно оси. Для жидкостей применяются тонкостенные кюветы, имеющие указанные выше формы. Резонаторы с коле-

баниями типа H_{01} могут иметь подвижной поршень для настройки; перемещение поршня, измеренное с помощью микрометрического винта, служит выходной величиной простейшего лабораторного влагомера. Как уже указывалось, описанные резонаторы непригодны для непрерывных измерений влажности. Исключение составляет измерение потока жидкости (или сыпучего материала при условии стабилизации его расхода), пропускаемого через коаксиальную трубку из диэлектрика, установленную в цилиндрическом резонаторе. При этом для сокращения потерь на излучение приходится ограничивать диаметр «проточной» трубки по сравнению с диаметром резонатора, что влечет за собой уменьшение чувствительности влагомера.

Наиболее подходящими для влагомеров являются открытые резонаторы, в частности их простейшая разновидность — «щелевые» резонаторы в виде отрезков прямоугольного волновода, в стенке которого прорезано отверстие; исследуемый материал располагается поверх отверстия и в случае необходимости отделяется от волновода тонким защитным слоем диэлектрика. Такой датчик позволяет непрерывно контролировать влажность разнообразных материалов (без введения их в резонансную полость) — песка, глиняного бруса и других материалов [Л. В-4]. Этот же принцип применялся с прямоугольным резонатором без одной стенки для измерения влажности листовых строительных материалов и с коаксиальным резонатором с открытой торцовой поверхностью — для бумаги. Щель располагается перпендикулярно вектору электрического поля и служит излучающим элементом. Ширина щели δ должна обеспечивать хорошее взаимодействие с материалом. В [Л. 4-28] рекомендуется принимать $\delta = (1/6 \div 1/4)\lambda$ (λ — длина волны), а величину зазора между материалом и внешней поверхностью щелевого резонатора, которая должна быть стабилизирована, выполнять не больше $\lambda/4$. Размеры щели, параметры резонатора и диэлектрические свойства материала определяют глубину проникновения поля в материал.

Было установлено [Л. В-4], что для каждого материала в заданном диапазоне влажности существует определенная толщина слоя, выше которой изменения количества материала (при постоянстве его плотности) не влияют на результат измерения.

Измерительные устройства резонаторных влагомеров можно разделить на однорезонаторные и двухрезонаторные (с измерительным и опорным резонаторами). Наиболее простой и удобной для автоматических влагомеров является измерительная схема, основанная на оценке мощности P, проходящей через резонатор, которая при резонансе пропорциональна квадрату его добротности. При малых сдвигах Δf резонансной частоты можно, следовательно, определить добротность Q заполненного резонатора из соотношения

$$Q/Q_0=(P/P_0)^{1/2},$$

где Q_0 и P_0 — добротность и прошедшая мощность пустого резонатора.

При известных параметрах резонатора ($Q_0=\text{const}$ и $P_0=\text{const}$) измерение добротности Q сводится к измерению проходящей мощности P. Для этого удобно применить схему, основанную на сравнении величин P_0 и P, аналогичную рассмотренным выше схемам влагомеров по проходящей волне в свободном пространстве.

Более сложен фазовый метод измерения, основанный на оценке добротности резонатора по фазовому сдвигу. Такую схему с использованием опорного сигнала с выхода генератора СВЧ и вектормерного вольтметра в качестве индикатора имеет влагомер для бумаги ($f_0=718$ *Мгц*) [Л. 4-29].

Двухрезонаторные схемы основаны на сравнении параметров измерительного резонатора и опорного, заполненного образцовым веществом. Схемы этого типа применяются в гигрометрии СВЧ (см. § 9-1). Для измерения резонаторным методом влажности твердых материалов и жидкостей достаточна значительно меньшая чувствительность, чем для газов. В связи с этим в двухрезонаторных влагомерах применяются более простые схемы, чем в гигрометрах СВЧ; схемы влагомеров основаны на известных способах измерения полных сопротивлений.

Одной из наиболее простых является мостовая схема с двойным волноводным тройником, к боковым плечам которого подключены измерительный и опорный резонаторы.

Волноводные методы основаны на влиянии диэлектрических свойств материала, введенного в волновод, на характеристики, определяющие распространение

радиоволн СВЧ в волноводе. Как и в ранее рассмотренных методах, измеряются комплексные коэффициенты передачи и отражения, их модули или фазовые углы; измерения выполняются при помощи проходящей или отраженной волны.

Распространенные волноводные способы измерения ε' и ε'' диэлектриков (методы короткого замыкания и холостого хода, вариации толщины образца, «бесконечного» слоя и другие) нашли применение во многих лабораторных исследованиях зависимостей диэлектрических параметров различных материалов от их влагосодержания (см., например, [Л. 2-9 и 2-21]). Применение этих методов во влагомерах нерационально, а в автоматических влагомерах невозможно. Более целесообразное решение дают измерительные схемы, аналогичные применяемым в методах свободного пространства и основанные на измерениях затухания или фазового сдвига. Влагомеры СВЧ данного типа имеют чувствительность меньшую, чем резонаторные. Основным препятствием для применения волноводного метода в производственных условиях являются затруднения, связанные с введением материалов (особенно твердых) в волновод и приспособлением исследуемых образцов к размерам волновода.

Вследствие этого волноводные влагомеры до сих пор нашли ограниченное применение в тех случаях, когда указанные затруднения преодолимы. В первую очередь это относится к жидким диэлектрикам — нефти и ее фракциям, для которых была разработана методика измерения влагосодержаний, начиная с очень коротких длин волн, находящихся в сантиметровом и миллиметровом диапазонах [Л. 4-30].

В автоматическом влагомере фирмы Филипс [Л. 0-1] для нефтей клистронный генератор ($f=9{,}1$ *Гц*) питает через двойной тройник две одинаковые волноводные линии, в которых перед короткозамыкателями установлены датчики — тефлоновые трубки, расположенные по продольной оси волновода. В измерительный датчик непрерывно поступает контролируемая нефть, опорный датчик содержит эту же нефть в обезвоженном состоянии. Сдвиг фаз между измеряемым и опорным сигналами, отраженными от обоих датчиков, измеряет фазовый детектор, роль которого выполняет двойной тройник с диодом. Детектированный разностный сигнал измеря-

ется электронным автоматическим потенциометром со шкалой, градуированной в процентах влажности.

В более позднем варианте предусмотрены два адсорбера с твердыми сорбентами для удаления влаги из нефти. Адсорберы попеременно работают в режиме осушки нефти или регенерации сорбента, и в процессе измерений обезвоженная нефть из контролируемого трубопровода непрерывно поступает в опорную ячейку.

Из числа твердых материалов волноводные влагомеры применяют преимущественно для тонких листовых — бумаги и бумажного полотна, текстильных тканей, синтетических пленок и искусственных волокон. Материалы этого типа вводятся в прямоугольный волновод параллельно направлению распространения через прорези, расположенные по осям противоположных широких стенок волновода; такой способ позволяет осуществлять контроль непрерывно движущихся материалов.

Выходной величиной измерительного преобразователя может служить затухание A в материале (выраженное в децибелах на единицу толщины материала), которое измеряют аппаратурой, сходной с применяемой в влагомерах свободного пространства. В заключение охарактеризуем кратко прочие методы СВЧ.

Метод концевых излучателей (зондов СВЧ) основан на введении в исследуемый материал зондов СВЧ различного вида: открытых отрезков волновода с тонкой перегородкой из диэлектрика, одиночных или спаренных металлических штырей и диэлектрических антенн. Выходными параметрами зондовых преобразователей могут служить их полное сопротивление, мощность, поглощенная материалом, и т. д.

Влагомеры с излучателями СВЧ позволяют выполнять «локальные» измерения в объеме материала, расположенном в непосредственной близости от них. Зонды СВЧ могут иметь очень малые размеры, а известные из теории и техники антенных устройств СВЧ способы дают возможность установить нужную зону действия зонда.

Принцип вращения плоскости поляризации волны СВЧ исследуемым материалом может быть реализован достаточно просто в свободном пространстве.

В патентной литературе имеются также предложения об использовании для измерений влажности твердых материалов, в частности бумажного полотна, поверхностной электромагнитной волны СВЧ [Л. 4-31].

4-4. ХАРАКТЕРИСТИКИ ДИЭЛЬКОМЕТРИЧЕСКИХ ВЛАГОМЕРОВ

В § 2-3 были рассмотрены зависимости диэлектрических свойств материалов от их влажности.

Ниже рассматривается влияние на эти характеристики возмущающих воздействий, связанных с изменениями свойств объекта измерения, которое зависит от параметров датчиков и измерительных устройств и определяет дополнительные погрешности диэлькометрических влагомеров.

Температурные характеристики отражают то обстоятельство, что у влагосодержащих материалов температура является второй (после влажности) величиной по степени влияния на электрические свойства. Температурный коэффициент диэлектрической проницаемости (относительное изменение на 1 °С) $\alpha = (1/\varepsilon)(\Delta\varepsilon/\Delta t)$ для большинства твердых тел положителен и имеет величину, близкую к 10^{-4} *град*$^{-1}$. Для воды в диапазоне температур $0 < t < 100$ °С часто используют упрощенное уравнение: $\varepsilon_t \approx \varepsilon_0 - 0{,}4(t - t_0)$. Температурные характеристики большинства неводных жидкостей в диапазоне частот до 10^7 *гц* аналогичны характеристикам воды и описываются линейными законами:

$$\varepsilon_t = \varepsilon_0[1 + \alpha(t - t_0)], \qquad (4\text{-}15)$$

где ε_t и ε_0 — значения диэлектрической проницаемости при температурах t и t_0 (обычно $t_0 = +20$ °С).

Такого рода зависимость была установлена для бензола, органических растворителей, нефтей и нефтепродуктов в диапазоне $0 \div +50$ °С. У подавляющего большинства нефтей коэффициент α отрицателен и находится в пределах $-1{,}6 \div -0{,}5 \cdot 10^{-3}$ *град*$^{-1}$ [Л. 1-8]; лишь у некоторых нефтепродуктов он положителен.

Автор исследовал влияние температуры в пределах от 0 до 40 °С на результаты измерения влажности зерна влагомерами резонансного типа в диапазоне мегагерцов [Л. 0-1]. Зависимость эффективной емкости датчика C от температуры близка к линейной. Угол наклона прямых $C(t)$ при $W = \text{const}$ повышается с ростом влажности. Аналогичное влияние оказывает температура на величину $\operatorname{tg}\delta$, причем степень влияния температуры на эту характеристику при высокой влажности значительно

больше, чем для C, $\operatorname{tg}\delta$ возрастает с ростом температуры по нелинейному закону.

Такой же характер имеет влияние температуры у многих других материалов. Коэффициент α можно считать постоянным в узких пределах изменений влажности W и температуры t; если диапазон изменения этих величин велик, то $\alpha=f(W, t)$.

Другим фактором, влияющим на температурные характеристики, является частота электрического поля. Температурно-частотные характеристики ряда материалов показывают, что понижение частоты усиливает относительное влияние температуры на величину ε'. При всех частотах влияние температуры увеличивается с ростом влажности материала. Такое же влияние оказывает изменение частоты на температурные характеристики $\operatorname{tg}\delta$ или ε''.

Если рассматривать более широкий диапазон частот, то у многих материалов можно выделить значения (или интервал) частот, для которых влияние температуры на ε' и ε'' минимально.

Практически у диэлькометрических влагомеров диапазона ниже 10^8 *гц* влияние температуры можно учесть введением температурной поправки к результатам измерения по формуле

$$W=W_{\text{п}}-k_t(t-t_0), \qquad (4\text{-}16)$$

где W — истинная влажность материала при температуре t; $W_{\text{п}}$ — результат отсчета влажности по шкале; t и t_0 — температура материала соответственно в момент измерения и при градуировке влагомера; k_t — температурный коэффициент для данного материала.

При измерении влажности твердых материалов температурная поправка прибавляется к результату измерения, если $t<t_0$, и вычитается при $t>t_0$. Величины температурных коэффициентов определяют экспериментом при градуировке влагомера; иногда целесообразно значения k_t дифференцировать по диапазонам измеряемой влажности.

Если пределы изменений влажности и отклонение температуры от градуировочной не очень велики, можно применять единую величину температурного коэффициента. У влагомеров без разделения составляющих полного сопротивления датчика средняя величина этого коэффициента для большинства материалов (при влажности $12<W<25\%$) близка к 0,1% влажности на 1 °С.

При определении в сантиметровом диапазоне (f = =9,4 *Гц*) температурных характеристик двух типичных влажных материалов (полиамидные гранулы и картофельная мука) [Л. 2-9] было установлено монотонное увеличение ε' с ростом температуры при сильном влиянии влажности на форму зависимости $\varepsilon'(t)$.

При влагосодержании 0—1% график $\varepsilon'(t)$ близок к горизонтальной прямой; для высоких влагосодержаний он явно нелинеен с большой крутизной для некоторых интервалов температур в пределах 0—100 °С. Зависимость $\varepsilon''(t)$ для полиамида, особенно при высоких влагосодержаниях, немонотонна и имеет максимум в интервале 20—50 °С.

При измерениях влагомером СВЧ сантиметрового диапазона на принципе ослабления [Л. 2-20] было установлено, что температурный коэффициент песка, асбоцемента и других материалов отрицателен и его значение, например, для асбоцемента увеличивается в пределах 0,03—0,07% H_2O на 1 °С при росте влажности с 8 до 18%.

В то же время у некоторых других материалов было установлено наличие положительного температурного коэффициента при измерениях тем же методом и при той же частоте. Нарастающий характер температурной характеристики $\Delta\varphi(t)$ был установлен при той же частоте у фазового влагомера для песка и ряда других материалов цементного производства [Л. 4-22]. Эту аномалию можно объяснить тем, что преобладание релаксационных потерь в свободной воде имеет следствием отрицательные значения коэффициента k_t (как у жидкой воды) и лишь при очень высоких влагосодержаниях, когда начинают превалировать дипольные потери воды, изменяется знак k_t.

Другим фактором, влияющим на знак k_t, может являться положение рабочей частоты относительно частоты релаксации исследуемого материала [Л. 2-5].

Рассмотренные характеристики относятся к температурам в пределах от 0 до +100 °С. При понижении температуры до 0 °С и ниже резкое изменение диэлектрических свойств воды при изменении ее агрегатного состояния (см. § 2-2) делает невозможным использование диэлькометрического метода.

Плотность материала оказывает существенное влияние на активную и реактивную составляющие полного

сопротивления емкостного датчика: это относится ко всем видам материалов. Наиболее просто влияние плотности ρ выражается у жидких диэлектриков; экспериментальные работы ряда исследователей подтвердили линейный характер зависимости $\varepsilon(\rho)$ у нефтей, причем начальное значение и коэффициент пропорциональности этой функции принимают различные значения для групп нефтей и нефтепродуктов различных месторождений. Имеются эмпирические данные, свидетельствующие о более сложном характере данной зависимости для некоторых нефтей.

Аналогичное влияние оказывает плотность на диэлектрические свойства твердых монолитных материалов (например, древесины) в сухом состоянии и на их влажностные характеристики. У листовых материалов влажностные характеристики в большинстве случаев перемещаются вдоль оси ординат на величину, пропорциональную массовой толщине $R=\rho d$ (ρ — плотность материала; d — толщина); эта величина характеризует массу материала, отнесенную к единице его площади.

Особенно велико значение плотности при измерениях влажности дисперсных материалов. Во всех случаях уплотнение материала в междуэлектродном пространстве увеличивает значения ε и $\operatorname{tg}\delta$, оказывая одновременно влияние на форму влажностных, частотных и температурных характеристик материала. Как правило, с повышением частоты влияние плотности на величину ε уменьшается. Можно предположить, что зависимости диэлектрических свойств от плотности в широком диапазоне частот являются немонотонными и существуют интервалы частот, в которых влияние плотности на ε' или ε'' материала минимально.

При принудительном уплотнении сыпучих и легко деформируемых материалов (хлопок, волокнистые материалы), как и в кондуктометрическом методе, наблюдается явление насыщения. Повышение уплотнения сверх некоторого предельного для данного материала значения уже не влияет на его диэлектрические свойства.

При измерениях на СВЧ в свободном пространстве [Л. 2-20] было показано, что для материалов различной структуры и физико-химических свойств справедливо соотношение

$$A=kWR, \qquad (4\text{-}17)$$

где A — затухание в материале; W — влажность; $R = \rho d$ — массовая толщина; k — коэффициент пропорциональности, характеризующий исследуемый материал и не зависящий от R. При постоянстве толщины d слоя материала (размера, параллельного направлению распространения волны) выражение (4-17) можно записать в виде

$$A = k_1 W_{об},$$

где $W_{об}$ — объемная влажность материала, характеризующая в данном случае массу воды, отнесенную к единице площади «просвечиваемого» материала.

Идентичный характер имеет влияние плотности для влагомеров СВЧ, у которых измеряется фазовый сдвиг волны в свободном пространстве. Таким образом, при измерениях с помощью диэлькометрических влагомеров, работающих на любых частотах, необходимо или стабилизировать плотность исследуемого материала, или вводить поправку в результаты измерения на изменения плотности.

Влияние гранулометрического состава сыпучих материалов проявляется особенно сильно при их «свободной» насыпке, без внешнего уплотнения. На частотах ниже 10^8 *гц* это влияние обусловлено изменениями плотности материала в междуэлектродном пространстве при изменениях размеров и формы отдельных частиц. При измерениях на СВЧ размеры частиц (точнее, их соотношение с длиной волны λ) оказывают влияние на отражение, рассеяние и поглощение ими энергии; считается, что частицы с диаметром больше $\lambda/4$ приводят к повышенному ослаблению. Имеющиеся данные о влиянии рассматриваемого параметра противоречивы.

Для устранения влияния степени дисперсности материала можно уплотнить образец постоянной массы в постоянном объеме, т. е. получить одинаковую плотность материала в междуэлектродном пространстве. При этом необходимым условием является отсутствие резкой разницы в размерах отдельных частиц; если размеры частиц сильно отклоняются от средней величины, следует предварительно измельчать наиболее крупные частицы.

При работе с зерном различных сельскохозяйственных культур определенное значение приобретают показатели, связанные с «натурным» (насыпным) весом зер-

на. Эффективным способом устранения влияния этого параметра является применение датчиков с уплотнением, стабилизирующим массу образца в постоянном объеме. Это было доказано при применении влагомеров СВЧ на принципе ослабления к бетонной смеси, инертные заполнители которой имели различный фракционный состав [Л. 4-32], а также к анионитам и катионитам. В обоих случаях размеры частиц были значительно меньше длины волны. При измерениях фазовым влагомером СВЧ [Л. 4-22] влажности цементных материалов, разделенных на ситах с диаметром отверстий от 0,1 до 10 *мм*, при свободной засыпке было установлено закономерное увеличение ослабления A и фазового сдвига $\Delta\varphi$ (при $W=\text{const}$) с увеличением размера частиц. Однако после пересчета на объемную влажность (т. е. с учетом плотности материала) экспериментальные точки для всех фракций легли вблизи единых графиков зависимости $A(W_{об})$ и $\Delta\varphi(W_{об})$.

Особое значение приобретает степень дисперсности в эмульсиях типа «вода в масле» или «масло в воде».

Опыт измерения влагосодержания жидких диэлектриков показывает, что ε растет с повышением не только концентрации дисперсной фазы (воды), но и степени ее дисперсности. Это наблюдается при измерениях диэлектрических параметров молока, смесей глицерина с водой и растительных масел. Кроме того, увеличение дисперсности повышает устойчивость эмульсии, т. е. способность частиц воды не отделяться от внешней фазы и не коагулироваться в капли, что является необходимым условием стабильности результатов измерений влагосодержания. Рассматриваемый фактор имеет большое значение при измерении влажности нефтепродуктов (см. § 1-1 и 3-2).

Наиболее сложным является вопрос о влиянии химического состава материала. Для жидких диэлектриков имеются теоретические и экспериментальные данные об отсутствии влияния содержания электролитов на их диэлектрические свойства. В то же время степень минерализации воды (у сырых нефтей, например, она может изменяться в очень широких пределах) оказывает существенное влияние на $\operatorname{tg}\delta$ водонефтяной эмульсии.

Экспериментальные данные, относящиеся к твердым материалам, свидетельствуют о сильном влиянии химического состава (включая состав непроводящих компо-

нентов) материала на его влажностные характеристики, полученные без разделения составляющих полного сопротивления датчика. Так, например, данные автора и ряда других исследователей указывают на невозможность использования единой градуировки влагомера для углей и торфов различных типов и месторождений, хотя степень измельчения и уплотнения образца, а также другие факторы, влияющие на результаты измерения, поддерживались одинаковыми. У дисперсного материала более простого состава — песка градуировка диэлькометрических влагомеров неоднозначна для песков, происходящих из разных карьеров.

Влияние содержания электролитов не только на ε'', но и на ε' было установлено и для ряда других материалов, например хлопчатобумажной ткани, непропитанной и пропитанной насыщенным раствором NaCl [Л. 4-33]. Высокая концентрация электролита резко повышала ε ткани, причем приращение ε увеличивалось с ростом влажности. Кроме того, измерения для льняных, меланжевых, камвольных и суконных тканей подтвердили существенные расхождения градуировочных кривых для тканей с различной природой волокна.

При применении диэлькометрических влагомеров диапазона мегагерц к растительному материалу с ничтожным содержанием электролитов — зерну хлебных злаков — затруднительно получение единой градуировки для зерна различных типов, районов и условий произрастания, даже в пределах одной культуры. В данном случае объект измерения имеет биологический характер и, кроме разного химического состава, имеются различия в формах и видах связи влаги и других физико-химических, биологических и биохимических свойствах живого организма.

Наметились два способа ослабления влияния химического состава объекта на результаты измерения диэлькометрическими влагомерами.

Первый заключается в применении устройств, измеряющих реактивную составляющую сопротивления датчика (ε' материала) без учета или с подавлением активной составляющей (ε'' материала). Второй путь сводится к повышению рабочей частоты. Некоторые исследователи считают достаточным повысить рабочую частоту влагомера в пределах нескольких единиц или десятков мегагерц.

Значительно более эффективен переход к измерениям на СВЧ в области сантиметровых и миллиметровых волн. Физически это обосновано превалированием в указанной области диэлектрических потерь в свободной воде над всеми другими видами потерь (см. рис. 2-3) и подтверждается рядом экспериментальных данных.

Сэкстон [Л. 4-34] путем расчетного и экспериментального сравнения электрических свойств пресной и морской (содержащей около 4% солей) воды установил, что в области аномальной дисперсии ($f=10^3 \div 10^6$ *Мгц*) по мере повышения частоты они все больше сближаются и для частот больше 10^4 *Мгц* становятся одинаковыми.

Измерения автора, выполненные на хромовой коже и пористом пенопласте [Л. 2-20] в широком диапазоне влагосодержаний, показали, что переходу от диапазона 0—10 *Мгц* к сантиметровым волнам сопутствует значительное уменьшение погрешности от содержания электролитов. В пределах сантиметровой области достигается дальнейшее уменьшение этой погрешности при переходе от длины волн 3 *см* к 1 *см*. Еще более интересны данные, полученные при применении в сантиметровом диапазоне фазового влагомера [Л. 4-22]. Для искусственных смесей материалов цементного производства (трепел и трепел+колчеданные огарки в различных соотношениях) по методу ослабления были получены различные влажностные характеристики $A(W)$, а по фазовому (начиная с $W=10\%$) — одна общая. Меньшая зависимость результатов измерения фазовым методом от состава твердого скелета материала подтвердилась и на некоторых других материалах.

При измерениях по методу затухания на частоте 9,4 *Ггц* для чисто хлопчатобумажной ткани и такой же ткани с примесью искусственного волокна были получены разные градуировочные кривые, а зависимость угла сдвига фаз от влагосодержания оказалась одинаковой для тканей обоих типов [Л. 4-23]. Если эта особенность фазовых влагомеров подтвердится для большого числа материалов, она будет являться их важным преимуществом.

Влияние распределения влаги в твердом материале в диэлькометрическом методе аналогично рассмотренному в кондуктометрическом методе; при наличии поверхностной влаги получаются завышенные результаты измерения. Диэлькометрические влагомеры, следова-

тельно, также неприменимы непосредственно после замачивания материала, увлажнения его водой и т. п. Однако, как показало исследование автора на зерне, влияние распределения влаги при прочих равных условиях сказывается в емкостном методе меньше, чем в кондуктометрическом. Измерения электрических характеристик зерна и хлопка-сырца позволили установить, что ошибку от неравномерности распределения влажности можно уменьшить повышением частоты.

Особенно большой эффект дает переход к СВЧ. На рис. 4-15 показаны результаты измерений на частотах 30 *Гец* и 2,4 *Мгц* на физической модели материала с не-

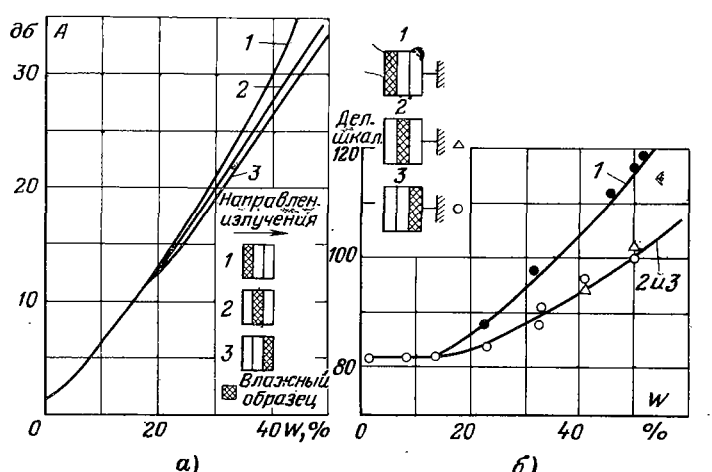


Рис. 4-15. Влияние распределения влаги в материале на результаты измерения влажности при различных частотах.
а — *f*=30 *Гец* (λ=1 *см*); *б* — *f*=2,4 *Мгц*.

равномерным распределением влаги в виде пакета из трех образцов листового пенопласта, один из которых увлажнялся до разных значений влажности, а два остальных имели влажность, равновесную с окружающим воздухом [Л. 2-20]. Три варианта расположения увлажненного образца относительно сухих (рис. 4-15) соответствовали трем формам распределения влаги, причем интегральная влажность образца в целом оставалась неизменной. Расхождения между результатами измерений для положений *1, 2, 3* при переходе с 2,4 *Мгц*

на СВЧ сократились в 3—4 раза. Аналогичные данные были получены при измерениях фазовым влагомером СВЧ.

В заключение остановимся на двух менее важных влияющих факторах. Анизотропия строения материала влияет на результаты измерения диэлькометрическим методом, как и в большинстве других физических методов. Это относится к древесине; в [Л. 4-25] показано, что при измерениях на СВЧ ($\lambda=3{,}4$ *см*) ориентация волокон — угол наклона α волокон относительно вектора электрического поля — определяет наклон влажностных характеристик $A(W)$.

При $W=\text{const}$ затухание максимально при измерениях вдоль волокон ($\alpha=0$) и минимально поперек волокон ($\alpha=90°$). Аналогичное влияние оказывает ориентация волокон и при измерениях фазового угла на СВЧ.

Влияние «истории влажности» было исследовано автором на тех же образцах зерна и той же методике, что и в кондуктометрическом методе. При этом не удалось выявить какого-либо закономерного влияния «истории влажности» на результаты измерения влажности диэлькометрическим влагомером.

Глава пятая

МЕТОДЫ, ОСНОВАННЫЕ НА ИЗМЕРЕНИИ НЕЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ

5-1. РАДИОМЕТРИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ

В настоящей главе рассматриваются методы измерения влажности твердых и жидких материалов, основанные на зависимости их различных физических параметров (кроме электрических) от влажности. Эти методы, развитые в последние десятилетия, базируются в основном на современных способах исследования состава, структуры и свойств вещества, использующих взаимодействие различных видов электромагнитных колебаний и ядерных излучений с исследуемым веществом. Общими достоинствами рассматриваемой группы методов является неконтактный способ измерения и отсутствие нару-

шения различных полей (температурных, влажностных, механических деформаций и т. д.) в объекте измерения, высокая чувствительность и быстродействие (измерение можно считать практически безынерционным). В то же время для их применения необходима аппаратура более сложная, чем в электрических методах.

В радиометрических (ядерно-физических) методах используются различные виды ядерных излучений (гамма-лучи, бета-частицы, быстрые нейтроны) и взаимодействий (поглощение и рассеяние гамма- и бета-излучений, упругое рассеяние быстрых нейтронов).

В основе гамма-методов лежит ослабление интенсивности гамма-излучения твердой фазой и влагой исследуемого материала в результате рассеяния и поглощения атомами вещества.

При неизменных условиях измерения (геометрия излучателя и его расположение относительно приемника излучения) ослабление интенсивности излучения в слое материала постоянной толщины зависит от содержания влаги в нем.

Рассмотрим основные разновидности гамма-методов измерения влажности [Л. 5-1].

а) Абсолютный гамма-метод с использованием коллимированного пучка гамма-квантов. Суммарный эффект ослабления гамма-излучения при прохождении через вещество описывается экспоненциальным законом:

$$I = I_0 e^{-\mu_л d}, \qquad (5\text{-}1)$$

где I_0 — интенсивность излучения, падающего на вещество (интенсивность излучения в воздухе); I — интенсивность излучения, прошедшего через слой вещества толщиной d ($см$); $\mu_л$ — линейный коэффициент ослабления, $см^{-1}$.

Ослабление излучения в веществе можно характеризовать также массовым коэффициентом ослабления $\mu_м = \mu_л/\rho$ (ρ — плотность вещества). Этот коэффициент, характеризующий ослабление в результате прохождения через слой вещества с массой 1 $г/см^2$, не зависит от плотности данного вещества. Закон ослабления с массовым коэффициентом принимает форму:

$$I = I_0 e^{-\mu_м \rho d} = I_0 e^{-\mu_м R}, \qquad (5\text{-}2)$$

где ρ — плотность поглотителя, $г/см^3$; $R = \rho d$ — массовая толщина поглотителя, т. е. масса единицы площади, $г/см^2$; $\mu_м$ — массовый коэффициент ослабления, $см^2/г$.

Приведенные формулы характеризуют ослабление однородным поглотителем узкого параллельного пучка монознергетического излучения. При применении радиоизотопных излучений для контроля состава и свойств материалов узкий пучок получают коллимированием, а иногда и дополнительным диафрагмированием излучения. В случае неоднородного поглощения приходится учитывать изменение коэффициента ослабления по толщине поглотителя. Радиоизотопные излучения часто имеют сложный спектральный состав. Коэффициенты ослабления являются функцией энергии излучения и неодинаковы

для различных линий спектра; сильнее всего поглощаются мягкие (обладающие минимальной энергией) компоненты излучения.

При пропускании через материалы, состоящие из элементов с легкими и средними атомными массами (почвы, грунты, строительные и другие материалы) излучения с энергией 0,5—1 *Мэв*, причиной ослабления интенсивности является почти исключительно комптон-эффект и величина коэффициентов ослабления ($\mu_л$ и $\mu_м$) зависит от отношения Z/A атомного номера элемента к массовому числу. Для водорода отношение $Z/A=1$, а для химических элементов, занимающих первые четыре ряда периодической системы Д. И. Менделеева, величина Z/A постоянна и в большинстве случаев близка к 0,5.

Практически чаще всего используются радиоизотопы Co^{60} или Cs^{137}; для них коэффициент $\mu_л$ воды равен соответственно 0,063 и 0,086, что более чем на 10% превышает значение $\mu_м$ твердой фазы упомянутых материалов.

Для вывода основного уравнения рассматриваемого метода будем считать, что влажный материал состоит из двух однородных частей: воды с коэффициентом ослабления μ_{H_2O} (для воды с плотностью 1 *г/см*^{3} массовый коэффициент ослабления равен линейному) и твердой фазы (сухого вещества), плотность которой равна ρ_c (*г/см*^{3}), а массовый коэффициент ослабления μ_c. Плотность влажного материала, изменяющуюся с влажностью, обозначим $\rho_ж$. Далее примем, что облучаемый образец материала имеет постоянную толщину d, не зависящую от влажности, и подсчитаем коэффициент массового поглощения влажного материала. Известно, что если поглотитель состоит из химического соединения нескольких элементов или смеси нескольких компонентов, то результирующий массовый коэффициент ослабления можно определить по аддитивному закону:

$$\mu_м = a_1\mu_1 + a_2\mu_2 + \ldots + a_n\mu_n, \qquad (5\text{-}3)$$

где μ_1, μ_2, ..., μ_n — массовые коэффициенты ослабления 1-го, 2-го, ..., n-го компонентов; a_1, a_2, ..., a_n — массовые доли этих компонентов.

Применяя формулу (5-3) к материалу с влажностью W (в долях массы влажного материала), получаем следующее выражение для его массового коэффициента ослабления $\mu_ж$:

$$\mu_ж = W\mu_{H_2O} + (1 - W)\,\mu_c = W\,(\mu_{H_2O} - \mu_c) + \mu_c. \qquad (5\text{-}4)$$

Произведем два измерения интенсивности излучения: в абсолютно сухом материале и в материале с влажностью W. В соответствии с (5-2) интенсивность излучения, прошедшего через сухой материал,

$$I_c = I_0 e^{-\mu_c \rho_c d}. \qquad (5\text{-}5)$$

Для влажного материала получим из (5-2) и (5-4):

$$I_ж = I_0 e^{-\rho_ж d\,[W(\mu_{H_2O} - \mu_c) + \mu_c]}. \qquad (5\text{-}6)$$

Формулы (5-5) и (5-6) после необходимых преобразований дают:

$$\ln \frac{I_c}{I_ж} = \rho_ж W d\,(\mu_{H_2O} - \mu_c) + \mu_c d\,(\rho_ж - \rho_c). \qquad (5\text{-}7)$$

Уравнение (5-7) показывает, что ослабление излучения обусловлено повышением влажности материала (первый член правой части уравнения) и изменением его плотности (второй член).

С учетом соотношения (см. § 1-2):

$$\rho_{\text{ж}} = \frac{\rho_{\text{с}}}{1 - W} \tag{5-8}$$

получим:

$$\ln \frac{I_{\text{с}}}{I_{\text{ж}}} = \frac{\rho_{\text{с}} W d}{1 - W} (\mu_{H_2O} - \mu_{\text{с}}) + \mu_{\text{с}} d \left(\frac{\rho_{\text{с}}}{1 - W} - \rho_{\text{с}} \right) =$$

$$= \rho_{\text{с}} d \frac{W}{1 - W} \mu_{H_2O}.$$

Учитывая, что $W/(1-W) = u$ (u — влагосодержание исследуемого образца), приходим к простой зависимости:

$$u = \frac{\ln \frac{I_{\text{с}}}{I_{\text{ж}}}}{d \rho_{\text{с}} \mu_{H_2O}}. \tag{5-9}$$

Уравнения (5-7) и (5-9) выведены при условии сохранения постоянства линейных размеров и объема образца материала при его увлажнении. Известно, что у большинства капиллярнопористых материалов в процессе сушки и увлажнения происходят усадка и набухание; у этих материалов величину d в указанных уравнениях следует рассматривать как функцию влажности. Влияние усадки и набухания материала учитывается при эмпирической градуировке радиоизотопного влагомера. У дисперсных материалов необходимым условием применимости уравнений (5-7) и (5-9) является исследование постоянной массы материала в постоянном объеме.

Важнейшим свойством рассматриваемого метода является влияние плотности твердой фазы $\rho_{\text{с}}$ материала на результаты измерения влажности. Непостоянство величины $\rho_{\text{с}}$ влечет за собой погрешности при измерении влажности. Еще важнее то обстоятельство, что для абсолютной оценки влажности материала (величины W или u) необходимо предварительно определить величины $\rho_{\text{с}}$ и $I_{\text{с}}$ для сухого материала. От необходимости определения величины $\rho_{\text{с}}$ можно освободиться, если ограничиться оценкой объемного влагосодержания материала $u_{\text{об}} = \rho_{\text{с}} u$. Действительно, на основании (5-9)

$$u_{\text{об}} = \frac{\ln \frac{I_{\text{с}}}{I_{\text{ж}}}}{d \mu_{H_2O}}. \tag{5-10}$$

В большинстве случаев знание объемных показателей влажности недостаточно. Основной областью практического применения метода ослабления гамма-излучений является оценка относительных изменений влажности.

Измерив интенсивности излучения I_1 и I_2, соответствующие двум значениям влагосодержания u_1 и u_2 ($u_{\text{об}1}$ и $u_{\text{об}2}$) при постоянной толщине d слоя материала, можно на основании (5-9) и (5-10) вы-

числить приращения влагосодержания:

$$\Delta u = u_2 - u_1 = \frac{\ln \frac{I_1}{I_2}}{d\rho_{\text{сl}}\mu_{H_2O}}$$

или

$$\Delta u_{\text{об}} = u_{\text{об2}} - u_{\text{об1}} = \frac{\ln \frac{I_1}{I_2}}{d\mu_{H_2O}}.$$

Если первое значение влагосодержания определено другим методом, то по результатам двух измерений интенсивности излучения можно определить влагосодержание, соответствующее второму измерению.

Недостатком гамма-метода с узким пучком является необходимость в массивных свинцовых коллиматорах, диафрагмах и экранах для детекторов, а также в источниках излучения большой активности.

От этих недостатков в значительной степени свободна спектроскопическая модификация гамма-метода. В приемном устройстве используется сцинтилляционный детектор, например, с кристаллом NaJ(Tl), с амплитудным дискриминатором, работающий в спектрометрическом режиме. Он регистрирует излучение, соответствующее первичным γ-квантам, и обеспечивает подавление регистрации многократно рассеянного излучения. Благодаря этому можно использовать источники малой активности с расходящимся пучком; в то же время отпадает необходимость в эмпирическом определении значения $\mu_{\text{эф}}$ (см. ниже).

б) Гамма-гамма-метод с использованием расходящегося (неколлимированного) пучка и регистрацией всех γ-квантов, попадающих на детектор. При этом ослабление излучения носит иной характер, чем для узкого пучка; разница в степени ослабления для широкого и узкого пучков тем больше, чем больше относительное значение комптон-эффекта.

Ослабление неколлимированного гамма-излучения описывается уравнением

$$I = I_0 e^{-\mu_{\text{ж}} d} + I_{\text{р}},$$

где $I_{\text{р}}$ — часть рассеянного излучения, регистрируемая детектором.

Величина $I_{\text{р}}$ зависит от плотности и химического состава среды, через которую проходит радиоизотопное излучение, от энергии излучений и свойств детектора. Чем чувствительнее детектор к мягкому излучению, тем сильнее он реагирует на рассеянные гамма-кванты.

Ослабление с учетом рассеяния также можно описать экспоненциальным законом при условии замены коэффициентов ослабления (линейного или массового) соответствующими эффективными коэффициентами ослабления широкого пучка $\mu_{\text{эф}}$. Величина $\mu_{\text{эф}}$ зависит от конкретных условий измерения, в том числе от размеров и взаимного расположения детектора и объекта измерения. Так, например, при измерениях влажности почвы величина $\mu_{\text{эф}}$ зависит от толщины контролируемого слоя почвы. На практике эту величину приходится определять и проверять опытным путем в реальных рабочих условиях.

в) Гамма-гамма-метод рассеяния основан на зависимости рассеяния и поглощения гамма-квантов от свойств вещества, в частности от его плотности и химического состава. Рассеянное излучение возникает в результате взаимодействия первичных гамма-квантов с электронами вещества; рассеянные кванты теряют часть своей энергии, изменяют траекторию и после многократных столкновений поглощаются атомами вещества. Коэффициент рассеяния, характеризующий потерю энергии рассеянным гамма-квантом, является функцией отношения Z/A элемента. С этим связано избирательное влияние воды в грунтах, почвах и других материалах на рассеяние гамма-излучений.

В зависимости от энергии первичных гамма-квантов их рассеяние определяется различными свойствами материала, окружающего источник. Рассеяние в объектах, состоящих из легких и средних элементов, при энергии гамма-излучения 0,3—3 *Мэв* определяется главным образом плотностью материала; это используется в гамма-плотномерах по рассеянному излучению.

При применении мягкого гамма-излучения с энергией 0,1—0,2 *Мэв* и ниже на рассеяние гамма-квантов оказывает преобладающее влияние химический состав вещества, что и используется для измерений влажности.

Скорость счета детектора определяется суммарной интенсивностью регистрируемого излучения:

$$I_р = I_1 + I_2 + I_3.$$

где I_1 — интенсивность излучения, рассеянного в среде, окружающей зонд; I_2 — интенсивность прямого излучения источника; I_3 — интенсивность излучения, рассеянного в самом зонде.

I_1 представляет собой полезный сигнал, I_2+I_3 — помехи, от которых детектор защищают свинцовым экраном.

Как и в методе ослабления гамма- и бета-излучений, прямые измерения влажности возможны только при условии дополнительного определения плотности сухого материала. При этом необходимо обеспечить максимальную чувствительность к мягким излучениям.

Применение для измерений влажности ослабления бета-излучений незначительно. Характеристики этого метода аналогичны характеристикам гамма-методов; для определения массовой влажности необходима дополнительная информация о плотности материала в сухом состоянии. Кроме того, вследствие меньшей проникающей способности бета-частиц их применяют для измерений плотности, толщины, веса и частично химического состава лишь тонких, главным образом листовых, материалов.

На практике бета-влагомеры применялись для автоматического контроля влажности движущихся лент или полотен листовых материалов до или после контактной сушки на сушильных цилиндрических барабанах.

Важной областью применения этих приборов является контроль высоких влагосодержаний (100% и выше) текстильных хлопчатобумажных тканей после отжима [Л. 5-2]

Основное практическое применение гамма-влагомеров—контроль влажности почв и грунтов, а также торфа в полевых условиях, без нарушения структуры материалов и отбора проб. Реже эти приборы использовались для контроля влагосодержания строительных конструкций и материалов (например, керамических масс).

В гамма-влагомерах применяются регистраторы импульсов и источники питания, аналогичные используемым в нейтронных влаго-

мерах (см. ниже); детекторами излучения служат газоразрядные (например, галогенные) или, реже, сцинтилляционные счетчики. Методика и техника измерений хорошо разработаны применительно к почвогрунтам [Л. 5-1].

Гамма- и нейтронные влагомеры позволяют осуществлять в почве глубинные измерения (с заглублением источника и детектора или только источника) и поверхностные. Различные способы глубинного зондирования почвы показаны на рис. 5-1; во всех случаях скважины армируют тонкостенными обсадными трубами.

Для послойных измерений влажности торфа в залежи горизонтальным просвечиванием была разработана специальная конструк-

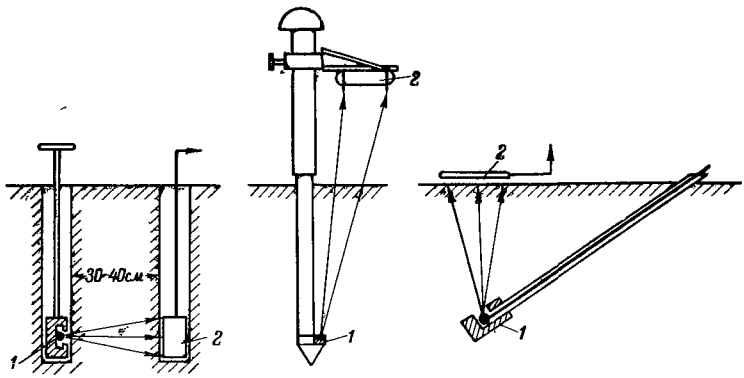


Рис. 5-1. Способы зондирования почвы при применении радиоизотопных влагомеров.
1 — излучатель; *2* — детектор.

ция датчика-зонда, так называемая радиовилка, позволяющая измерять влажность на полной глубине залежи (до 3—4 *м*).

Для почвы и грунтов разрабатываются также «пенетрационные» способы быстрого введения зондов вдавливанием с помощью винтового бура или ударными способами без проходки скважин.

При поверхностных измерениях источник и приемник излучения располагаются в датчике на поверхности почвогрунта без какого-либо нарушения его естественного сложения. Этот способ реализуется, в частности, в гамма-гамма-влагомерах и плотномерах. При очевидных преимуществах недостатками этого метода являются малая глубина зондирования и сильное влияние характера и состояния поверхности на результаты измерения. Измерение с заглублением одного лишь источника представляет собой компромиссное решение. Относительный характер измерений влажности ограничивает применение рассматриваемого метода как в отношении числа материалов, так и круга решаемых задач

Гамма-методы в последние годы мало применяются для непосредственного определения влажности; в этой области они вытесняются нейтронным методом. Гамма- и бета-методы используются для измерения плотности в комбинированных приборах влагомерах-плотномерах (см. § 5-4).

Рентгеновский метод измерения влажности твердых материалов, основанный на взаимодействии рентгеновских лучей с просвечиваемым объектом, имеет характеристики, аналогичные характеристикам гамма-метода, но обладает большей чувствительностью благодаря тому, что вода сильнее поглощает рентгеновское излучение, чем гамма-лучи. Рентгеновские влагомеры могут измерять высокие влагосодержания. Ослабление рентгеновских лучей веществом подчиняется экспоненциальному закону [формула (5-1)]. Для обычно применяемого диапазона длин волн λ справедливо приближенное соотношение $\mu \approx \rho(\lambda Z)^3$, где ρ и Z — плотность и атомный номер вещества. Измерение влажности сводится к определению отношения I_0/I. Рентгеновский метод позволяет определять объемную влажность; для измерения массовой влажности необходима информация о плотности и толщине исследуемого материала.

Для автоматического контроля можно применить двухволновый метод измерения, основанный на определении отношения I_0/I на двух длинах волн: λ_1 и λ_2 [Л. 5-3]. В известном диапазоне длин волн (например, при $\lambda_1 = 0{,}64$ Å и $\lambda_2 = 0{,}25$ Å) влагосодержание u определяется выражением

$$u = k \frac{\ln (I_0/I)_{\lambda_1}}{\ln (I_0/I)_{\lambda_2}}$$

(k — коэффициент пропорциональности) и результат измерения u не зависит от плотности и толщины материала. Нужные длины волн выделяются из излучения полихроматического источника с помощью двух непрерывно вращающихся фильтров. Детектором служит сцинтилляционный счетчик, выходные сигналы которого поступают на амплитудный анализатор, а затем на вычислительное устройство, к выходу которого подключен показывающий и записывающий прибор влагомера.

Рентгеновский метод до настоящего времени не нашел практического применения.

В нейтронных влагомерах быстрые нейтроны (с энергией до 11 *Мэв*), испускаемые источником, взаимодействуют с ядрами элементов окружающей среды. Основными процессами являются (происходящие в указанной последовательности): рассеяние нейтронов, главным образом упругое, замедление до тепловой энергии и диффузия. Рассеянные нейтроны, изменяя направление движения и теряя энергию, превращаются в тепловые, имеющие очень низкую энергию — до 0,5 *эв* (средняя энергия тепловых нейтронов около 0,025 *эв*). Иногда используются нейтроны («надтепловые») с энергией несколько выше тепловой — приблизительно до 2 *эв*. Кроме ядерной реакции типа (n, n), используется и захватное излучение-реакция (n, γ), в результате которой ядро, захватившее тепловой нейтрон, излучает гамма-кванты.

Водород является наиболее эффективным замедлителем быстрых нейтронов. Благодаря этому замедляющая способность s воды в сотни раз превышает значения s ядер кислорода, алюминия, кремния и других наиболее распространенных элементов.

Если облучать материал, состоящий из таких элементов и влаги, быстрыми нейтронами и считать количество медленных нейтронов, полученных в результате рассеяния нейтронного потока в материале, можно определить содержание атомов H в нем. При условии, что подавляющее большинство атомов H содержится во влаге, а потери энергии нейтронов для всех остальных элементов достаточно близки, это позволяет определить влагосодержание материала. Плотность тепловых нейтронов вблизи излучателя зависит от числа атомов водорода, содержащихся в единице объема исследуемого материала. С этим связаны некоторые особенности нейтронного метода измерения влажности: в этом методе измеряется объемная влажность.

Форма характеристики нейтронного влагомера зависит от расстояния между источником быстрых нейтронов и приемником медленных нейтронов. Существует определенное («инверсионное») расстояние между точечным источником и серединой приемника, при котором плотность медленных нейтронов не зависит от свойств окружающей среды. При расстояниях, больших инверсионного, плотность нейтронов уменьшается с ростом содержания водорода. Если расстояние меньше инверсионного, рост содержания водорода вызывает увеличение плотности медленных нейтронов; датчики нейтронных влагомеров работают обычно в этой «доинверсионной» области.

Математические модели нейтронных влагомеров, представляющие собой теоретические зависимости плотности тепловых нейтронов от параметров влагомера и исследуемой среды, были предложены различными исследователями на основе разных методик [Л. 5-4].

Данные о распределении плотности тепловых нейтронов в реальных объектах близки к полученным аналитическим путем, но не совпадают с ними. Причиной является то, что математические модели не учитывают некоторых весьма существенных влияющих факторов (содержание водорода в твердой фазе, аппаратурные факторы и ряд других), рассматриваемых ниже. Вследствие этого для градуировки и испытаний нейтронных

влагомеров, как правило, применяются экспериментальные методы.

Основными частями нейтронного влагомера являются: зонд для глубинных измерений или датчик для поверхностных, регистратор импульсов с источником питания, контрольно-защитное устройство. Зонд или датчик содержат излучатель быстрых и детектор медленных нейтронов, а иногда и каскад предварительного усиления, необходимый для использования длинного кабеля, соединяющего зонд с регистратором импульсов.

В качестве радиоизотопных излучателей нейтронов используются Pu-Be, Po-Be, Am-Be, Ra-Be.

Экран зондов используется в качестве контейнера для транспортировки и хранения; в то же время он служит эталоном для периодической проверки показаний влагомера. Удобнее всего контейнер, имеющий форму цилиндра с осевым цилиндрическим каналом. У поверхностных датчиков экран находится внутри кожуха, а эталоном для проверки служит отдельный блок. Устройство зондов и датчиков различных типов показано на рис. 5-2.

В детекторах медленных нейтронов используются реакции: а) $B^{10}(n, \alpha)Li^7$; б) $He^3(n, p)H^3$; в) $Li^6(n, \alpha)H^3$; г) $Cd^{113}(n\gamma)Cd^{114}$.

Первые две реакции находят применение в пропорциональных газоразрядных счетчиках, из которых наиболее распространенными являются борные с заполнением парами BF_3, отличающиеся низкой чувствительностью к гамма-излучению, благодаря чему отпадает необходимость в экране между источником и детектором. Применяемые в последнее время счетчики с гелиевым наполнителем отличаются большей эффективностью детектирования медленных нейтронов.

Из сцинтилляционных детекторов (реакция *в*) наиболее подходящими являются кристаллы Li^6J, активированные европием, и особенно сцинтилляционные стекла, обогащенные литием.

Преимуществами сцинтилляционных счетчиков по сравнению с газоразрядными являются высокая чувствительность и возможность использования тонкого слоя (несколько миллиметров) детектора. Их высокая эффективность по отношению к гамма-излучению вызывает необходимость в разделительном экране между источником и детектором, но в то же время дает возможность

использовать их (в сочетании с амплитудным дискриминатором импульсов) в комбинированных влагомерах-плотномерах (см. § 5-4).

К недостаткам системы сцинтиллятор — фотоэлектронный умножитель относятся меньшая механическая прочность и необходимость высококачественной стабилизации напряжения питания.

По предложению В. А. Емельянова [Л. 5-1], в СССР применяются детекторы медленных нейтронов по захватному излучению (n, γ) кадмия с обычными галоген-

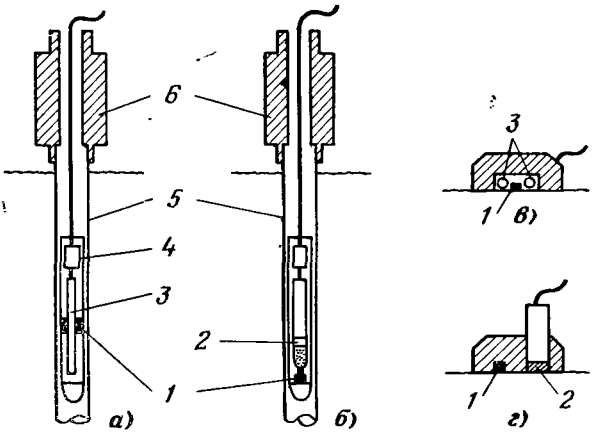


Рис. 5-2. Глубинные зонды (*а*, *б*) и поверхностные датчики (*в*, *г*) нейтронных влагомеров.

1 — источник; *2* — сцинтилляционный счетчик; *3* — пропорциональный газоразрядный счетчик; *4* — предусилитель; *5* — обсадная труба; *6* — экран.

ными счетчиками гамма-квантов, имеющими низкое рабочее напряжение. Кадмиевые зонды позволяют применить простые радиометры, но их чувствительность к изменениям влажности, особенно при малых влагосодержаниях, ниже, а фоновая скорость счета выше, чем у борных счетчиков.

Способы и техника измерений влажности нейтронным методом хорошо разработаны применительно к почвогрунтам. Как и в гамма-методах, возможно глубинное или поверхностное измерение. В первом случае зонд вводят на заданную глубину в предварительно выполненную скважину. При бурении скважин необходимо обеспечить их прямолинейность и устранить возможность деформа-

ции стенок. Для этого скважины армируют обсадными трубами (металлическими или пластмассовыми). Вбивание или вдавливание зонда непосредственно в объект измерения нарушает его структуру и допустимо лишь для недеформируемых материалов.

Большое практическое значение имеет оценка объема, контролируемого нейтронным влагомером. При градуировке эта величина определяет минимальный допустимый объем используемых образцов, при глубинных измерениях — вертикальную разрешающую способность и допустимое приближение к поверхности раздела почва — воздух. Указанный объем характеризуют «сферой влияния» (именуемой также «сферой значения», а по терминологии В. А. Емельянова — «показывающей сферой»), т. е. сферой с центром, расположенным в источнике (точечном), обеспечивающей при отсутствии какого-либо материала вне сферы скорость счета, равную 95% скорости счета для бесконечной среды. При градуировке сфера влияния должна обеспечивать 99% скорости счета. Указанное понятие условно, так как в действительности (при равномерности влажности и симметричном зонде) измеряется объем эллипсоида или овала вращения.

Для приближенного определения сферы влияния в почвогрунтах часто применяют формулу Ван-Бавела:

$$R = 15\sqrt[3]{100/W_{об}},$$

где R — радиус сферы, *см*; $W_{об}$ — объемная влажность почвы, %.

Более точные результаты дает предложенная Олгардом [Л. 5-4] формула

$$R = \frac{100}{1{,}4 + 0{,}1W_{об}}.$$

Приведенные формулы не являются универсальными. Они не учитывают конструктивных особенностей зонда и условий его работы. Поэтому более достоверным является экспериментальное определение вертикального и горизонтального радиусов сферы влияния для конкретных условий измерения и конструкции зонда.

В почвогрунтах сфера влияния имеет радиус (в зависимости от $W_{об}$) в пределах 20—40 *см*.

При поверхностных измерениях датчики прикладывают к поверхности почвы. Это избавляет от затруднений, связанных с введением зондов в почву, но влечет за

собой сильное влияние на результаты измерения условий соприкосновения датчика с поверхностью, в частности воздушных зазоров между ними.

Поверхность объекта измерения приходится разравнивать или подготавливать другими способами. Другим существенным недостатком является малая величина «показывающего слоя». Это понятие эквивалентно «сфере влияния» и описывается полуобъемом эллипсоида вращения или полусферой. Глубину показывающего слоя можно определить экспериментом.

Для повышения скорости счета в поверхностных датчиках применяют экраны-отражатели, окружающие источник и детектор. Материал отражателя не должен существенно замедлять нейтроны (во избежание увеличения фона), но должен эффективно их отражать.

При этом в объект измерения проникают не только прямые, но и отраженные нейтроны. Нижний предел измеряемой влажности понижается, но чувствительность влагомера и глубина измеряемого слоя H уменьшаются в связи с меньшей энергией отраженных нейтронов. Для увеличения значения H, которое при измерении влажности почвы поверхностным датчиком не превышает в среднем 10—20 *см*, и уменьшения влияния воздушного зазора были разработаны поверхностно-глубинные влагомеры, у которых детектор находится на поверхности грунта, а источник вводится на некоторую глубину в почву. Глубину введения излучателя в почву приходится ограничивать из-за эффекта инверсии и нарушения линейности зависимости скорости счета от влажности.

Для твердых материалов, не являющихся почвогрунтами, были разработаны в дополнение к рассмотренным выше некоторые специальные приемы измерения. Влажность строительных деталей, компонентов бетона и других сыпучих материалов измеряли методом «просвечивания» с размещением источника и детектора вне объема, заполненного материалом; указывалось, что при этом уменьшается влияние распределения влаги в объекте по сравнению с поверхностными измерениями. Другой «бесконтактный» способ измерения реализуется с помощью датчика, установленного на некотором расстоянии от исследуемого материала, перемещаемого транспортерной лентой, в трубе и т. п. Датчик представляет собой отражатель, в полости которого находятся источник и детектор, причем детектор защищен экраном из материала,

содержащего кадмий или бор, от тепловых нейтронов, отраженных отражателем. Такой датчик можно вводить в массу сыпучего материала. В нейтронных влагомерах для автоматического контроля влажности материалов в потоке применяются приемные устройства, аналогичные датчикам автоматических электровлагомеров (§ 3-3).

Перейдем к рассмотрению факторов, влияющих на характеристики нейтронных влагомеров: скорость счета I и ее зависимости от влажности, размеры сфер влияния, погрешности измерения влажности и чувствительность влагомера

$$S = \frac{dI}{I} \Big/ \frac{dW_{об}}{W_{об}}.$$

Эти факторы можно разделить на следующие группы: а) параметры аппаратуры (измерительных устройств, зондов и датчиков); б) параметры объекта измерения; в) условия измерения. Влияние перечисленных факторов изучено в первую очередь применительно к почвогрунтам. Погрешности измерительной аппаратуры нейтронных влагомеров — измерителей счета (пересчетные устройства) или используемых реже интенсиметров с интеграторами — освещены в литературе и не рассматриваются нами.

Из параметров зонда важнейшее значение имеют взаимное расположение излучателя и детектора, от которого зависят чувствительность зонда и форма градуировочной зависимости $I(W_{об})$, а также длина и диаметр детектора, определяющие эффективность зонда и скорость счета. Оптимальную геометрию зонда получают в результате компромисса, учитывающего перечисленные и некоторые другие характеристики влагомера. Так, например, при сокращении расстояния излучатель — детектор уменьшается вертикальный радиус сферы влияния. У поверхностных датчиков дополнительными влияющими факторами являются размеры и материал экрана-отражателя.

Условия измерения должны возможно точнее воспроизводить условия, имевшиеся при градуировке влагомера. Для глубинных измерений в почвах и грунтах это относится к диаметру скважин, материалу и толщине обсадных труб, отсутствию зазоров между скважиной и обсадной трубой. Влияние зазоров между подошвой датчика и поверхностью почвы уже отмечалось выше.

Важнейшие влияющие параметры материала — плотность и химический состав.

Изменение плотности твердой фазы ρ_c влечет за собой изменение числа атомов в единице объема, способных рассеивать и захватывать быстрые нейтроны, и, следовательно, смещает вверх или вниз (в зависимости от знака изменения плотности) градуировочную характеристику влагомера и изменяет ее крутизну (рис. 5-3,*а*) [Л. 5-4]. Гранулометрический состав материала сам по

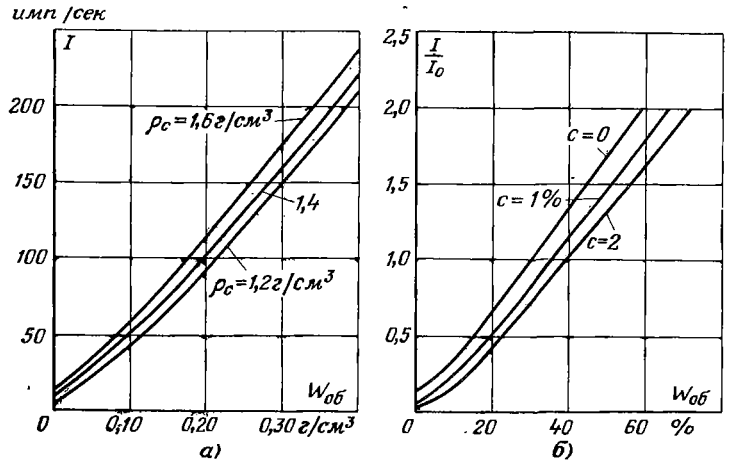


Рис. 5-3. Влияние плотности песка (*а*) и концентрации NaCl в почве (*б*) на зависимость скорости счета от объемной влажности.
I/I_0 — скорость счета по отношению к эталону.

себе не влияет на показания нейтронного влагомера, но только при условии сохранения постоянства плотности материала в зоне влияния; если же с изменением размеров частиц связано изменение плотности, это вызывает соответствующую погрешность измерения.

Существенным влияющим фактором, относящимся к химическому составу материала, является наличие аномальных поглотителей медленных нейтронов и водорода твердой фазы. Наиболее распространенными аномальными поглотителями являются B, Cl, Li, Fe (при больших концентрациях), K и Co; некоторые из них содержатся, например, в засоленных почвогрунтах. Влияние концентрации (*c*) NaCl в почве на градуировочную характеристику влагомера иллюстрирует рис. 5-3,*б*.

Влияние аномальных поглотителей можно существенно ослабить, если детектировать вместо тепловых надтепловые нейтроны. Для этого можно использовать любой детектор тепловых нейтронов, окружив его кадмием. Однако такой способ сильно понижает эффективность детектора и чувствительность влагомера. Некоторое улучшение эффективности достигается применением счетчиков с гелиевым наполнителем вместо борного или введением слоя водородсодержащего замедлителя (например, оргстекла) между кадмиевым экраном и детектором.

Нейтронные влагомеры измеряют общее содержание водорода в воде и твердой фазе, причем 1 *г* H_2O на 1 *см*^{3} эквивалентен 0,111 *г* H на 1 *см*^{3}. Неустранимая погрешность от колебаний содержания водорода в твердой фазе H_c для грунтов, строительных и аналогичных им материалов невелика, так как уже при низких влагосодержаниях начинает превалировать содержание водорода в воде, а колебания H_c, отнесенные к общему содержанию водорода, незначительны. Более существенна роль этого фактора у материалов, в состав которых входит большое количество водородсодержащих веществ — торфа, угля, почв с большим содержанием гумуса и т. п.

Существует, однако, мнение, что водород кристаллических решеток и органического вещества почв обладает меньшей замедляющей способностью, чем водород свободной воды. Согласно этим воззрениям замедление быстрых нейтронов до энергий, превышающих 1 *эв*, происходит на ядрах водорода независимо от его формы связи с замедляющим веществом, а в интервале 1 — 0,025 *эв* определяется не только водородом, но и молекулой, содержащей его. Такая избирательность нейтронных влагомеров представляет интерес для количественного разграничения влаги по формам связи, которое можно осуществить с помощью детекторов двух типов, регистрирующих соответственно надтепловые и тепловые нейтроны. Эта идея была реализована в работах [Л. 5-5 и 5-6].

Составляющая погрешности влагомера, связанная с составом и свойствами материала и условиями измерения, равна:

$$\Delta W_м = \sqrt{\Delta W_x^2 + \Delta W_п + \Delta W_у^2},$$

где среднеквадратичные погрешности имеют следующее значение: ΔW_x — от колебаний химического состава (содержание аномальных поглотителей и водорода в твердой фазе); $\Delta W_п$ — от колебаний плотности твердой фазы; $\Delta W_у$ — от неучитываемых условий измерения (зазоры между обсадной трубой или подошвой датчика и объектом, неравномерность распределения влаги и т. д.). Погрешность измерительного устройства имеет систематическую составляющую $a_п$, равную основной погрешности регистратора импульсов, и случайную составляющую, равную статистической погрешности скорости счета $\sigma_с = \sqrt{N/t} = \sqrt{I}$ (N — число сосчитанных импульсов за время t). Задаваясь допустимой величиной $\sigma_с$, можно определить минимальные значения N или t или же верхний предел постоянной времени интенсиметра. Погрешность измерителя можно уменьшить, используя «внутренний эталон» в контрольно-защитном устройстве влагомера.

Область применения нейтронных влагомеров в последние годы заметно расширилась. Она охватывает не только измерения влажности почвогрунтов и связанных с ней величин в агротехнике, мелиорации, почвоведении, гидрологии, дорожном, гражданском и промышленном строительстве, но также контроль и регулирование влажности ряда материалов в промышленности.

Достоинства нейтронного метода — широкий диапазон измерений (до 100%), интегральная оценка влажности в сравнительно большом объеме. Для почв и грунтов большое значение имеет возможность полевых измерений в условиях естественного залегания без отбора проб, вертикального и горизонтального профилирования влажности на объектах большой площади и большой глубины.

К недостаткам метода относятся влияние на результат измерения содержания некоторых элементов и плотности твердой фазы, недостаточная пространственная разрешающая способность и трудность применения для тонких листовых материалов.

Влияние концентрации водорода твердой фазы на результаты измерения влажности ограничивает применение нейтронного метода к органическим объектам, углю, литейным смесям и некоторым другим материалам.

С техникой измерения связаны затруднения и погрешности, обусловленные градиентами влажности, введением зондов в скважины и переменными зазорами между зондом (датчиком) и объектом измерения.

Основным недостатком нейтронного и других радиационных методов является необходимость защиты от биологических действий излучения. Для создания безопасных условий работы с источниками γ-квантов и быстрых нейтронов, особенно при установке и демонтировании приборов, необходимы специальные защитные устройства и меры предосторожности.

5-2. МЕТОД ЯДЕРНОГО МАГНИТНОГО РЕЗОНАНСА

Ядерный магнитный резонанс (ЯМР), представляющий собой одно из направлений радиоспектроскопии, с 1950 г. применяют для определения влажности твердых материалов и жидкостей. По теоретическим основам ЯМР и технике его применения имеется обширная литература, в связи с чем ограничимся элементарным изложением принципиальных основ влагомеров ЯМР и рассмотрением применяемой в них аппаратуры.

В основе метода ЯМР лежит резонансное поглощение радиочастотной энергии ядрами атомов водорода (протонами) воды при помещении влажного материала в постоянное магнитное поле. Явление ЯМР связано с квантовыми переходами между зеемановскими энергетическими уровнями атомных ядер, возникающими в результате взаимодействия ядерного магнитного момента с внешним магнитным полем.

Протоны, как и другие элементарные частицы, которым присущ спиновый магнетизм, обладают собственным магнитным моментом и ведут себя во внешнем магнитном поле как миниатюрные прецессирующие магниты (прецессия Лармора). При помещении протонов в постоянное магнитное поле с напряженностью H_0 существуют два разрешенных энергетических уровня, определяющих ориентацию осей элементарных магнитов по направлению поля или против поля. Переходы между уровнями достигаются воздействием на протоны переменного радиочастотного магнитного поля, перпендикулярного постоянному полю. Система приходит к резонансу, проявляющемуся в изменениях ориентации ядер в постоянном магнитном поле, в результате взаимодей-

ствия ядерного магнитного момента с радиочастотным полем при частоте ν_0, удовлетворяющей основному квантовому условию:

$$\Delta E = h\nu_0 = h\gamma H_0/2\pi,$$

где ΔE — разность энергетических уровней; h — постоянная Планка; ν_0 — резонансная частота поглощаемого излучения; γ — гиромагнитное отношение магнитного диполя, характерное для каждого изотопа и равное отношению магнитного момента ядра к моменту количества движения.

Протон имеет наибольшее гиромагнитное отношение из всех ядер (кроме трития) $\gamma_{пр} = 2{,}675 \cdot 10^8$ *тл*$^{-1} \cdot$ *сек*$^{-1}$.

Условие резонанса можно записать в следующей форме:

$$\omega_0 = 2\pi\nu_0 = \gamma H_0,$$

где ω_0 — угловая резонансная частота.

Поглощенная образцом вещества энергия радиочастотного поля зависит от количества протонов водорода в этом образце; по величине поглощения можно, следовательно, оценить влагосодержание исследуемого вещества.

Для наблюдения ЯМР образец материала, подвергаемый воздействию постоянного магнитного поля, помещают в цилиндрическую катушку, ось которой перпендикулярна направлению поля; по катушке проходит переменный ток высокой частоты. Резонанса можно достигнуть двумя путями: сохранением постоянства напряженности поля H_0 и изменением частоты ν_0 переменного тока или изменением в узких пределах величины H_0 при сохранении $\nu_0 = \text{const}$. В спектрометрах ЯМР чаще используют второй способ. При резонансе имеет место максимальное поглощение радиочастотной энергии. Его фиксируют по параметрам высокочастотного колебательного контура, в который входит катушка с образцом.

Исследуемый образец можно рассматривать макроскопически как магнит с результирующим магнитным моментом M_0:

$$M_0 = \varkappa H_0,$$

где $\varkappa$ — магнитная восприимчивость исследуемого вещества, $\varkappa = N\mu^2/3kT$, где N — число протонов в объеме образца; μ — магнитный момент протона; k — постоянная Больцмана; T — температура.

Если в начальный момент $H_0=0$, энергетические уровни имеют одинаковую населенность $N/2$. При быстром изменении напряженности поля с 0 до H_0 приближение системы к состоянию равновесия сопровождается перераспределением населенности энергетических уровней и обменом энергии между системой ядер (спиновой системой) и окружающей средой; этот процесс имеет релаксационный характер и описывается уравнением

$$M_z=M_0[1-\exp(-t/T_1)],$$

где t — время; T_1 — время продольной (спин-решеточной) релаксации.

При одновременном действии постоянного поля H_0 в направлении z и радиочастотного поля, поляризованного в плоскости x, y, перпендикулярной z, переходный процесс для поперечной составляющей намагниченности также носит релаксационный характер:

$$M_{xy}=M\exp(-t/T_2),$$

где T_2 — время поперечной (спин-спиновой) релаксации, характеризующее скорость обмена энергией между ядрами.

Величины T_1 и T_2 имеют существенное значение для влагомеров ЯМР. У жидкостей T_1 и T_2 почти равны и имеют величину в несколько секунд (для воды $T_1=T_2=2{,}7$ *сек*). У твердых тел T_2 может иметь очень малую величину (10^{-4}—10^{-5} *сек*), в то время как T_1 равно секундам или даже минутам; для льда $T_2=10$ *мксек*.

Перейдем к рассмотрению техники и аппаратуры, используемых для измерений влажности.

Известны различные способы наблюдения резонанса; для измерений влажности обычно используют однокатушечные детекторы поглощения, у которых катушка служит одновременно для создания поля и выявления резонанса. Для измерения параметров катушки индуктивности при возникновении резонанса используются различные схемы [Л. 5-7].

Катушка совместно с измерительной схемой составляют спин-детектор, т. е. первичный преобразователь влагомера ЯМР, преобразующий влажность в выходной сигнал.

Информацию о числе протонов в исследуемом образце несет резонансный сигнал, получаемый в виде выходного напряжения спин-детектора. Для выделения сиг-

налов ЯМР им придают периодический характер посредством модуляции (чаще всего синусоидальной) магнитного поля постоянного магнита при помощи катушек, питаемых генератором звуковой частоты. В этих условиях осуществляется амплитудная модуляция напряжения на колебательном контуре. Детектированное и усиленное напряжение с выхода спин-детектора подается в простейшем случае на вертикальные отклоняющие пластины электронного осциллографа, развертка которого синхронизирована с частотой модуляции. Для анализа используются различные параметры сигналов ЯМР, в частности параметры одной линии поглощения. Спектр поглощения описывается функциями $I_p = f(\nu)$ при $H_0 = \text{const}$ или $I_p = F(H)$ при $\nu = \text{const}$, где I_p — поглощение высокочастотной энергии. Линию поглощения можно характеризовать пиковой амплитудой $I_{p\,макс}$ или шириной линии ΔH, соответствующей $0{,}5\,I_{p\,макс}$; эти величины показаны на рис. 5-4,*а* для чистой воды. При измерениях влажности на линию поглощения сильно влияет агрегатное состояние вещества. Жидкости, как правило, имеют очень узкие линии поглощения ($\Delta H \approx 10^{-7}$ *тл*), твердые тела — значительно более широкие (около 10^{-4} *тл*). Линию поглощения вещества, содержащего водород не только в воде, но и в твердой фазе (рис. 5-4,*б*), можно рассматривать как результат наложения двух линий *1* и *2*, симметричных относительно ν_0. Линия поглощения *2* протонов твердого вещества, ограниченных в своем движении, широка и полога; более подвижные протоны жидкости дают узкую и острую линию поглощения *1*. При

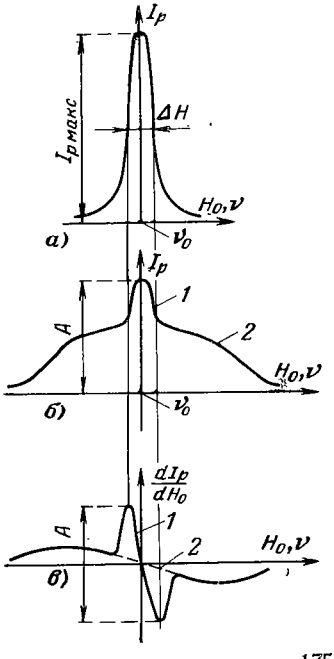


Рис. 5-4. Линии ядерного магнитного резонансного поглощения в воде (*а*) и твердых влажных материалах (*б* и *в*).

б — кривая поглощения; *в* — первая производная кривой поглощения.

измерении влажности рассматриваемого материала возникает задача выделения узкого (полезного) сигнала на фоне широкого, являющегося помехой. Отношение полезного сигнала к шуму уменьшается с понижением влагосодержания, и разделение сигналов особенно важно при низких влагосодержаниях.

Для решения этой задачи используется несколько способов. Дифференциальное измерение заключается в регистрации не функции поглощения, а ее первой производной $\frac{dI_p}{dH_0}(H_0)$; форма последней кривой показана на рис. 5-4,*в*. Влажность оценивают по двойной амплитуде пика A дифференциальной кривой поглощения, на которую поглощение в твердой фазе образца оказывает лишь ничтожное влияние.

Другой способ основан на использовании интенсивности гармонических составляющих сигнала ЯМР. При синусоидальной модуляции магнитного поля можно выделить с помощью избирательных цепей любую из гармоник сигнала. Для ослабления влияния широкого сигнала измерение выполняется по интенсивности (амплитуде) второй гармоники при выборе амплитуды модуляции, близкой к ширине ΔH узкого сигнала и значительно меньшей, чем величина ΔH широкого сигнала. Амплитуда второй гармоники достигает максимума при точной настройке на резонанс.

В измерениях влажности можно использовать также ширину сигнала ΔH, связанную, как и пиковая амплитуда, со временем поперечной релаксации T_2: $\Delta H = 1/2\,T_2$. При понижении влажности линия поглощения становится более широкой.

Преимущество этого способа — независимость величины ΔH (при постоянной влажности) от массы исследуемого образца. В то же время возникают повышенные требования к аппаратуре — высокая однородность магнитного поля в объеме образца и высокая чувствительность. В связи с этим измерение по ширине сигнала ЯМР нашло ограниченное применение.

Параметром резонансного сигнала, учитывающим одновременно его максимальное значение и ширину, является «интегральная интенсивность», пропорциональная площади, ограниченной кривой поглощения и осью абсцисс. Этот показатель при известных условиях не за-

висит от времен релаксации и наиболее точно характеризует число протонов, содержащихся в образце.

Широкий сигнал ЯМР можно рассматривать как полезный при оценке состояния и форм связи влаги с сухим веществом. Такой подход применялся при исследовании процессов, связанных с изменением форм связи влаги в материалах, например старения смесей окиси алюминия и цемента с водой, связывания воды в цементе и извести [Л. 5-8]. При этом дифференциальный сигнал ЯМР рассматривался как наложение узкой линии свободной и адсорбированной воды и широкой линии, соответствующей связанной воде. С течением времени (по мере связывания воды) амплитуда первой составляющей уменьшалась, а ширина второй — увеличивалась. Двойное интегрирование полученных кривых позволило оценить изменение соотношения количеств адсорбированной и связанной воды в ходе исследуемого процесса в течение нескольких или нескольких десятков суток.

Основным общим требованием к аппаратуре влагомеров ЯМР является увеличение отношения полезного сигнала к шуму. Для этого можно использовать ряд способов, выбор которых в значительной мере определяет схему влагомера ЯМР и устройство его важнейших узлов.

Для регистрации производной кривой поглощения на полюсы постоянного магнита надевают катушки развертки поля, питаемые пилообразным напряжением, и амплитуду синусоидальных колебаний поля устанавливают меньше полосы резонансного поглощения. В результате такой двойной модуляции магнитного поля осуществляется амплитудная модуляция выходного напряжения спин-детектора по закону производной ЯМР сигнала. Для получения высокой избирательности измерительного тракта в него включают узкополосный усилитель и фазовый синхронный детектор.

Такой «метод дифференциального прохождения» применяется и для регистрации интегральной интенсивности сигнала. При этом синусоидальная модуляция заменяется модуляцией по меандру, амплитуда которого несколько превышает ширину линии резонансного поглощения, а положительный и отрицательный (с измененной полярностью) сигналы поступают на вход электронного интегратора.

Важным требованием является максимальная однородность магнитного поля в объеме образца. У спектрометра высокой разрешающей способности относительная максимальная неоднородность равна 10^{-7}—10^{-8}, а объем исследуемого образца очень мал (до 0,3 $см^3$). Для измерения влажности применяются спектрометры низкого разрешения (10^{-5}—10^{-6}), у которых объем образца может быть значительно больше (до десятков $см^3$).

Кроме того, необходимо иметь большую индукцию постоянного магнитного поля при его высокой стабильности. Индукцию в зазоре до 0,6—0,7 $тл$ дают постоянные магниты; электромагниты позволяют получать более высокие значения индукции и изменять ее. Для повышения однородности поля в зазоре магнита применяют специальные кольца из ферромагнитных материалов, а также вспомогательные обмотки на полюсах для коррекции поля. Стабилизация напряженности магнитного поля достигается у электромагнитов применением стабилизаторов тока питания; иногда для стабилизации поля используется выходной сигнал спин-детектора. При повышении напряженности и однородности поля увеличиваются размеры и масса магнита (в современных влагомерах до 60—70 $кг$); поэтому часто предпочтение отдается постоянным магнитам, которые по сравнению с электромагнитами позволяют уменьшить габариты и массу влагомера, не требуя источника питания и стабилизирующих устройств. Равномерность радиочастотного поля в катушке соленоидного типа достигается без особых затруднений; достаточно, чтобы цилиндрический образец имел ось, совпадающую с осью катушки, и занимал не более 60% объема ее полости. Образец вводится в катушку в пробирке, изготовленной из калиброванной стеклянной трубки, или в трубке из твердого диэлектрика. Часто предусматривают координатный механизм, позволяющий перемещать трубку с образцом в вертикальной и горизонтальной плоскостях для установки в наиболее однородной области поля. Катушка индуктивности и весь измерительный колебательный контур должны иметь высокую добротность.

На рис. 5-5 приведена блок-схема влагомера ЯМР, основанная на методе дифференциального прохождения и содержащая синхронный детектор с очень узкой полосой пропускания. Опорное напряжение для него поступает с генератора звуковой частоты через фазовраща-

тель; максимуму кривой поглощения соответствует изменение полярности выходного напряжения детектора, регистрируемого самопишущим прибором.

Влагомер, разработанный в Институте автоматики АН Киргизской ССР, отличается восстановлением добротности резонансного контура после замены образца и автоматической настройкой резонансного режима [Л. 5-9]. Первую задачу выполняет блок восстановления добротности, управляющий конденсатором переменной емкости колебательного контура генератора высокой частоты. Измерение влажности осуществляется по второй гармонике сигнала поглощения с использованием первой гармони-

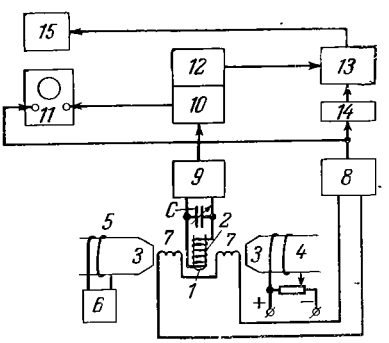


Рис. 5-5. Блок-схема влагомера ЯМР.

1 — сосуд с образцом; *2* — катушка индуктивности; *3* — постоянный магнит; *4* — обмотки коррекции поля; *5* — катушки развертки поля; *6* — генератор пилообразного напряжения; *7* — модулирующая катушка; *8* — генератор низкой частоты; *9* — генератор высокой частоты; *10* — амплитудный детектор; *11* — электроннолучевой осциллограф; *12* — узкополосный усилитель; *13* — синхронный детектор; *14* — фазовращатель; *15* — самопишущий прибор.

ки для автоматической настройки на резонанс. Сигнал ЯМР после детектирования и усиления поступает на входы двух избирательных усилителей, выделяющих его первую (f) и вторую ($2f$) гармонические составляющие. К усилителю $2f$ через фазовый детектор с балансным каскадом подключен выходной показывающий прибор влагомера. Резонансный режим поддерживается следящей системой, в которую входят избирательный усилитель f, усилитель мощности и реверсивный двигатель, перемещающий ползунок потенциометра. Управляющим воздействием является изменение напряжения питания катушек коррекции поля. Входным сигналом служит амплитуда первой гармоники, которая равна нулю при точной настройке на резонанс, а при расстройке в ту или иную сторону изменяет фазу на 180°.

Градуировку влагомеров ЯМР выполняют эмпирически, строя кривую для единицы массы исследуемого материала. При высокой влажности зависимость показаний влагомера ЯМР от влажности близка к линейной. С по-

нижением влажности и связанным с этим уменьшением количества протонов в образце чувствительность метода уменьшается. Когда влажность становится очень низкой (для ряда материалов при $W<5\%$), отношение сигнала к шуму настолько мало, что измерение влажности становится практически невозможным. Изгиб кривой при низкой влажности объясняется влиянием формы связи воды. В диапазоне очень высокой влажности может наступить явление высокочастотного насыщения, заключающееся в уменьшении амплитуды сигнала при росте напряженности радиочастотного поля; величину этой напряженности необходимо выбирать применительно к максимальной измеряемой влажности.

Источниками погрешностей влагомеров ЯМР могут являться (кроме отмеченных — неоднородности и нестабильности магнитного поля и нестабильности частоты переменного поля) также изменения коэффициента заполнения датчика и плотности материала. Температура материала оказывает некоторое влияние на первую гармонику сигнала ЯМР; с ростом температуры уменьшается его амплитуда и ухудшается отношение сигнал/шум.

Затруднения возникают, если исследуемый материал содержит водородсодержащие компоненты, жидкие или растворимые в воде. В этом случае кривые поглощения не дают возможности отличить протоны этих растворимых компонентов от протонов воды. Если количество таких растворимых компонентов невелико и постоянно, они могут быть учтены при градуировке. В противном случае возможны большие погрешности в измерении влажности методом ЯМР. Это ограничивает возможности влагомеров ЯМР и уменьшает их точность при анализе материалов, содержащих водород в жидкой фазе (например, масел, жиров, нефтей и др.). Был предложен ряд способов, позволяющих разделить сигнал протонов воды от сигнала протонов других компонентов материала при одинаковой или близкой ширине этих сигналов [Л. 5-10].

Метод ЯМР, как и нейтронный, реагирует непосредственно на количество атомов водорода в материале и обладает сходными достоинствами, в частности достаточно высокой точностью и возможностью измерения очень высоких влагосодержаний [Л. 5-11]. Малое влияние содержания водорода в твердой фазе вещества, а также отсутствие вредного биологического действия выгодно отличают метод ЯМР от нейтронного. Метод

ЯМР пригоден и для автоматического контроля влажности некоторых материалов; в производственных процессах недостатком является относительно малый объем контролируемого образца.

Определенными преимуществами по сравнению с рассмотренным «непрерывным» методом ЯМР обладает импульсный метод «спинового эха» [Л. 0-7 и 5-12]. Генератор высокой частоты, точно соответствующей условию резонанса, дает импульсы, длительность и период следования τ которых (рис. 5-6,*а*) меньше времени T_2 поперечной релаксации. Первый импульс (длительностью $t_{и1}=t_1-t_0$) поворачивает суммарный макроскопический

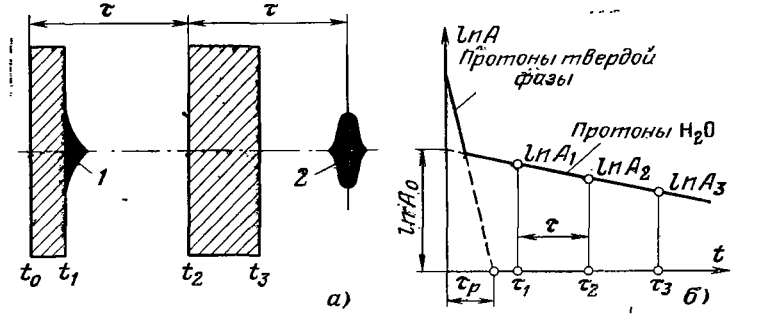


Рис. 5-6. Метод спинового эха; принцип действия (*а*) и изменение сигнала во времени при $W=\text{const}$ (*б*).
1 — сигнал свободной прецессии; *2* — сигнал спинового эха.

магнитный момент M из положения вдоль постоянного поля на угол $\pi/2$, второй ($t_{и2}=2t_{и1}$) — на угол π. Под влиянием этих импульсов через интервал времени 2τ в приемной катушке возникает высокочастотный импульс, характеризующий значение M в момент t_0. Увеличение периода τ влечет за собой уменьшение амплитуды A «эхо-сигнала»:

$$A=A_0\exp(-2\tau/T_2),$$

где A_0 — амплитуда, экстраполированная к начальному моменту времени $t=0$:

$$A_0=N_0\frac{\mu_0^2}{3kT}\sin\alpha_1\sin^2\left(\frac{\alpha_2}{2}\right);$$

$$\alpha_1=\gamma H_1 t_{и1};\quad \alpha_2=\gamma H_1 t_{и2};$$

H_1 — амплитуда напряженности высокочастотного поля, остальные обозначения приведены на стр. 173. Индекс 0

относится к значениям соответствующих величин в начальный момент времени.

Оптимальную настройку длительности $\pi/2$- и π-импульсов и периода τ можно производить непосредственно при измерении, причем критерием служит максимизация выходного сигнала. Кроме того, выбрав $\tau > T_1$ (T_1 — время продольной релаксации), можно исключить эффект насыщения. В качестве величины, характеризующей влажность, используется время T_2 поперечной релаксации или амплитуда сигнала A_0. Часть амплитуды сигнала, обусловленная протонами твердой фазы, легко выделяется, так как для них значения T_2 значительно меньше, чем для сорбированной воды. Если принять $\tau \geqslant \geqslant \tau_p$ (рис. 5-6,*б*), эхо-сигнал дают лишь протоны твердой фазы и начальная экстраполированная амплитуда A_0 однозначно характеризует влажность материала. Импульсный метод позволяет, следовательно, получить значительно большее отношение сигнала к шуму, чем непрерывный. При исследованиях угольной шихты нескольких марок была установлена линейная зависимость $A_0(W)$ при изменении влажности W в широких пределах; аналогичные результаты были получены для фильтровальной бумаги, зерна, крупы и ряда других материалов.

Главным достоинством импульсного метода является устранение влияния неоднородности магнитного поля; магнит может иметь меньшие размеры и вес, чем в непрерывном методе ЯМР.

Метод спинового эха не нашел еще широкого применения для измерений влажности. Он свидетельствует, однако, о дальнейших возможностях усовершенствования влагомеров ЯМР путем использования тех модификаций метода ЯМР, которые были разработаны в спектроскопии твердого тела. Основными недостатками метода ЯМР по сравнению с другими методами измерения влажности остаются сложность и громоздкость применяемой аппаратуры и ее более высокая стоимость. Эти факторы препятствуют широкому внедрению влагомеров ЯМР для контроля и управления производственными процессами.

5-3. ОПТИЧЕСКИЕ, ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ И ПРОЧИЕ МЕТОДЫ

Оптические методы основаны на зависимости оптических свойств материалов от их влагосодержания. Для твердых веществ и жидкостей используются инфракрасная и видимая области спектра.

Измерения влажности представляют собой одно из аналитических приложений инфракрасной абсорбционной спектроскопии, теория и техника которой подробно освещены в литературе. В влагомерах используется преимущественно коротковолновая область (длина волны λ от 0,8 до 3 *мкм*) инфракрасного спектра. В этой области имеются интенсивные полосы поглощения жидкой воды; кроме того, в ней можно использовать стеклянные оптические детали, в том числе кюветы для исследуемого материала, а также наиболее простые источники и детекторы излучения. Известно, что спектр поглощения жидкой воды усложнен по сравнению с поглощением водяного пара наличием водородных связей. Положение и интенсивность полос поглощения воды в растворителях изменяются под влиянием межмолекулярных взаимодействий; интенсивность зависит также от температуры воды. В твердых телах дополнительным фактором, влияющим на положение максимума поглощения, является прочность связи воды с веществом.

В качестве основной характеристики инфракрасного влагомера абсорбционного типа удобно использовать зависимость оптической плотности $D=\lg(I_0/I)$, (I_0, I — интенсивности излучения, падающего на слой вещества и прошедшего через него) от концентрации влаги. Вода в неполярном жидком растворителе, с которым она не образует химических соединений, в основном подчиняется закону Бугера — Ламберта — Бера, и указанная зависимость линейна (по крайней мере в диапазоне малых концентраций воды). Инфракрасный метод измерения влажности применялся к широкому кругу органических растворителей. В последние годы его важнейшими практическими применениями являются измерения влагосодержания водонефтяных эмульсий, бензина и других топлив. Высокая чувствительность инфракрасного метода позволила выполнять измерения в диапазоне от микроконцентраций (0—100 м. д.) [1] до очень высоких (10—20%). При прохождении параллельного пучка монохроматического излучения через слой водной эмульсии энергия пучка частично поглощается, частично рассеивается и отражается и лишь часть пучка выходит без изменения первоначального направления и детектируется. Интенсивность рассеянного излучения является функцией не только концентрации влаги в эмульсии и условий измерения (длина волны, угол между направлениями падающего и рассеянного излучения), но и свойств компонентов эмульсии — их коэффициентов преломления, а также размеров водяных глобул.

Выходной величиной оптического преобразователя служит ослабление энергии пучка, являющееся результирующим эффектом перечисленных видов взаимодействия излучения с веществом. Исследование оптических свойств водонефтяных эмульсий и их компонентов [Л. 1-1] показало, что эффект рассеяния на каплях может превосходить эффект поглощения, а эффектом отражения можно пренебречь.

Рассеяние можно рассматривать как помеху, воздействующую на преобразователь влажности; воздействие этой помехи можно компенсировать, применяя двухволновый метод измерения (см. ниже). Такой подход характерен для большинства современных инфракрасных влагомеров, например турбидиметрических (по ослаблению прямого пучка). Однако рассеяние в переднюю полусферу несет полезную информацию о влагосодержании. Поэтому правомочна также методика измерения по рассеянию излучения с подавлением сигнала

[1] См. стр. 25.

поглощения или же комбинированного измерения по обеим составляющим ослабления. Последняя методика характерна для большинства одноволновых влагомеров.

Рассмотрим устройство инфракрасных влагомеров. Для выделения нужного участка спектра излучателя в них используются твердые узкополосные фильтры — интерференционные или, реже, наборы стеклянных фильтров. Источником излучения в ближней инфракрасной области обычно служит электрическая лампа накаливания с вольфрамовой нитью. Наиболее распространенными приемниками излучения являются фотодиоды и фоторезисторы, например свинцово-сернистые, у которых максимум спектральной характеристики находится в ближней области ИК-спектра. Они более надежны и долговечны, чем используемые в более длинноволновом диапазоне термические приемники (болометры, термоэлементы).

По оптической схеме инфракрасные влагомеры, как и другие оптические анализаторы, можно разделить на однолучевые и двухлучевые. Однолучевые состоят из источника излучения, светофильтра, кюветы с исследуемым образцом, приемника излучения, усилителя с выходным прибором, а также оптической системы для формирования узкого прямого пучка, направляемого на кювету, а после прохождения кюветы — для фокусирования на детектор. Модуляция падающего излучения (чаще всего механическая с помощью диска, вращаемого синхронным электродвигателем и несущего светофильтр) позволяет использовать усилитель переменного тока. Для получения линейной шкалы выходного прибора в единицах влажности применяют логарифмический усилитель. Процесс измерения состоит в сравнении прозрачности исследуемого образца и эталона; для жидкостей эталоном служит безводный растворитель (реже — эталонный фильтр или незаполненная кювета).

Однолучевые приборы более просты, чем двухлучевые, однако уступают им по точности. В погрешность измерения входит инструментальная погрешность, вызванная нестабильностью параметров.

В двухлучевых приборах, имеющих два измерительных канала — измерительный и эталонный, измерение выполняется методом сравнения с постоянно действующим «внутренним эталоном». Оба канала могут иметь свои приемники; большую точность позволяет получить схема с одним приемником и устройством, подключающим к нему поочередно оба канала. Выходной сигнал влагомера формируется по разности сигналов обоих каналов или по их отношению.

В зависимости от числа длин волн, используемых для измерения, различают влагомеры одноволновые и двухволновые. В одноволновых влагомерах сравниваются оптические плотности объекта измерения и эталона в области характеристического поглощения волны. Двухволновые сравнивают прозрачность исследуемой жидкости в двух областях — аналитической ($\lambda_{ан}$) и эталонной ($\lambda_{эт}$); при стабилизации интенсивности I_0 падающего излучения отпадает необходимость в эталоне. Значения $\lambda_{ан}$ и $\lambda_{эт}$ можно выбрать на основе анализа спектров поглощения и рассеяния растворителя и воды. Для компенсации погрешностей от рассеяния (и ряда других источников) $\lambda_{ан}$ должна находиться в области характеристического поглощения воды, а $\lambda_{эт}$ — в области, где оно отсутствует; интервал между $\lambda_{ан}$ и $\lambda_{эт}$ должен быть минимальным, а рассеивающие свойства исследуемой жидкости в обеих полосах должны быть близкими.

В распространенных влагомерах этого типа механический модулятор с двумя светофильтрами обеспечивает (одновременно с моду-

ляцией) выделение $\lambda_{ан}$ и $\lambda_{эт}$. На приемник поступают чередующиеся импульсы, соответствующие интенсивностям излучения, прошедшего через исследуемую жидкость на обеих длинах волн. На выходе аналогового вычислительного устройства формируется характеризующий влажность сигнал, величина которого пропорциональна отношению обоих сигналов после демодуляции. Для измерений влагосодержания некоторых растворителей и водонефтяных эмульсий использовались длины волн $\lambda_{ан}=1{,}93$ *мкм* и $\lambda_{эт}=1{,}98$ *мкм* или $\lambda_{эт}=1{,}83$ *мкм*. Двухволновый влагомер с проточной кюветой и автоматическим уравновешиванием (с цепью обратной связи), построенный по двухволновой схеме, можно использовать для непрерывного автоматического контроля и регулирования производственных процессов.

Инфракрасные влагомеры для твердых материалов работают по принципу поглощения или отражения излучения. Влагомеры по поглощению используются для тонких листовых материалов, прозрачных для инфракрасных лучей, главным образом бумаги. Для непрерывного контроля движущегося бумажного полотна на бумагоделательной машине были разработаны автоматические влагомеры двухволнового типа. Ослабление зависит от толщины и плотности (у листовых материалов — массовой толщины) просвечиваемого материала. Компенсация влияния массовой толщины R была достигнута при «трехволновом» способе измерения; кроме аналитической длины волны $\lambda_{ан}=1{,}935$ *мкм*, использовались $\lambda=2{,}11$ *мкм*, чувствительная к величине R, и эталонная $\lambda=1{,}82$ *мкм* [Л. 5-13].

Датчик ИК-влагомера может быть выполнен сканирующим с возвратно-поступательным движением поперек полотна, причем его скорость может быть значительно выше, чем у радиоизотопных (бета-) влагомеров-плотномеров, где она ограничена величиной статистической погрешности прибора.

Инфракрасный абсорбционный метод применим к любым твердым веществам при условии подготовки образцов в виде тонкого однородного слоя, сжатого между двумя параллельными прозрачными пластинами, или в виде таблетки.

Специфическим для твердых материалов разнообразной структуры является метод, основанный на использовании спектра диффузного отражения инфракрасных лучей. При применении двухволнового метода обе длины волны должны находиться достаточно далеко от видимой области спектра, для того чтобы поглощение света исследуемым материалом, связанное с его окраской, не влияло на результат измерения.

Отражательную способность исследуемого материала можно оценить отношением интенсивностей отраженных монохроматических излучений при длинах волны $\lambda_{ан}$ и $\lambda_{эт}$.

Рассматриваемый метод был применен при длинах волны $\lambda_{ан}=1{,}96$ *мкм* и $\lambda_{эт}=1{,}7$ *мкм* к некоторым непрозрачным материалам — текстильным тканям, коже и бумаге.

Графики зависимости отношения отражений $R_{1{,}96}/R_{1{,}7}$ от влагосодержания исследованных материалов приведены на рис. 5-7. Чувствительность влагомера максимальна в области низких влагосодержаний и понижается с ростом влажности.

На описанном методе основаны инфракрасные лабораторные и автоматические влагомеры, выпускаемые в ряде стран. В большинстве из них приняты значения $\lambda_{ан}=1{,}93\div1{,}96$ *мкм*, $\lambda_{эт}=1{,}7\div1{,}8$ *мкм*; отраженные и рассеянные материалом излучения интегрируются сферической поверхностью. Иногда предусматривается настройка на

нуль и верхний предел шкалы по эталонам отражения в виде таблеток соответствующих химических соединений (для эталона белизны — таблетки баритовые или окиси магния). Влагомер для бумаги имеет элемент настройки на массовую толщину, устанавливаемый по образцу бумаги исследуемого сорта, влажность которого известна. Пример простой схемы влагомера по отражению показан на рис. 5-8.

Измерение по описанному методу освобождает от некоторых погрешностей, присущих другим методам; по сравнению с методом поглощения преимуществом является одностороннее расположение излучателя и приемника. Однако, как и в других методах, основанных на отражении излучения, измеряемой величиной является влажность поверхностного слоя материала, которая в ряде случаев (тяжелые сорта бумаг, наличие градиентов влажности по толщине материала) неудовлетворительно характеризует среднюю влажность материала. Отмечалось также, что при измерениях сыпучих материалов наличие некоторых примесей (например, окисей металлов — Fe_2O_3 и др. — в огнеупорах) вызывает большие погрешности.

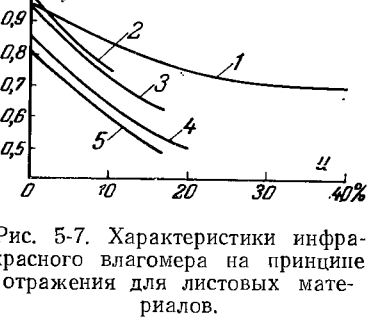


Рис. 5-7. Характеристики инфракрасного влагомера на принципе отражения для листовых материалов.

1 — кожа; *2* — льняное полотно; *3* — бумага; *4* — байка; *5* — шерсть.

Значительно меньшее значение, чем инфракрасные, имеют оптические влагомеры, работающие в области видимых лучей и основанные на способности некоторых твердых материалов изменять свою окраску и коэффициент отражения в функции влагосодержания. Влажность материала оценивают по отражению излучения, соответствующего широкому участку видимого спектра.

Уменьшение отражательной способности поверхности с ростом влажности, наблюдаемое почти у всех грунтов и почв, было использовано в фотоэлектрическом почвенном влагомере.

Влагомеры на принципе отражения видимого света в ряде случаев и, в частности, для тонко измельченных (порошкообразных) материалов имеют удовлетворительную чувствительность и точность; их достоинством является простота конструкции. В то же время они неприменимы при высоких влагосодержаниях (у грунтов для $u>20\%$), а изменения гранулометрического состава и наличие примесей, отличающихся своими оптическими характеристиками, могут вызвать большие погрешности.

Поглощение видимого света было использовано и для автоматического контроля наличия нерастворенной влаги в авиационных топливах. Для контроля влагосодержания некоторых нефтепродуктов применялся также метод точки помутнения, основанный на постепенном охлаждении образца и определении его температуры в момент начала образования тумана. Некоторые приборы этого типа описаны в [Л. 5-14].

Теплофизические влагомеры основаны на зависимости от влажности материала его теплофизических параметров — коэффициента теплопроводности λ, удельной теплоемкости c и коэф-

фициента температуропроводности $a=\lambda/c\rho$ (ρ — плотность материала). Эта зависимость наблюдается у всех капиллярнопористых материалов и была исследована экспериментальным путем для многих материалов [Л. 5-15].

Как правило, параметры λ и c нелинейно и монотонно увеличиваются с ростом влагосодержания u; однако у некоторых материалов зависимость $\lambda(u)$ имеет экстремум. Зависимости $\lambda(u)$ и $c(u)$ описываются эмпирическими формулами, достаточно точными лишь для одного материала или определенной группы материалов.

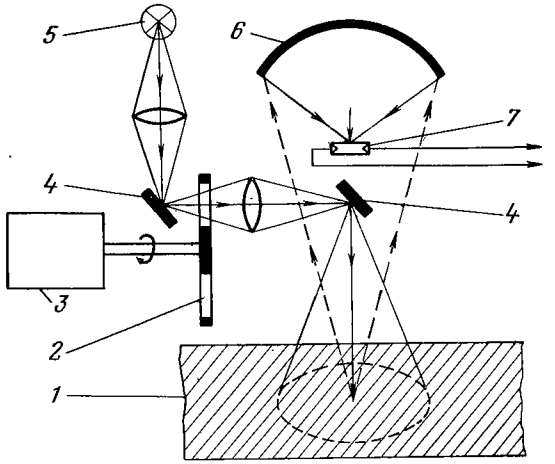


Рис. 5-8. Схема устройства инфракрасного влагомера на принципе отражения.

1 — образец материала; *2* — диск со светофильтрами; *3* — синхронный электродвигатель; *4* — зеркала; *5* — лампа; *6* — вогнутое зеркало; *7* — фоторезистор.

Рассматриваемые влагомеры применялись для грунтов, строительных материалов и конструкций, а затем и других твердых материалов и (в меньшей степени) жидкостей.

Большинство осуществленных влагомеров основано на зависимости $\lambda(W)$ (практически на результат измерения влияют и другие параметры материала). Величину λ определяют известными методами, преимущественно нестационарными (отличающимися по сравнению со стационарными методами меньшей длительностью опыта), например по скорости нагрева материала, в который введен нагреватель. При идеализации системы материал — нагреватель (проволочный нагреватель бесконечной длины и пренебрежимо малой толщины в бесконечной однородной и изотропной среде) повышение температуры на некотором расстоянии от нагревателя описывается уравнением [Л. 5-16]

$$\frac{\partial\theta}{\partial \ln t}=\frac{q}{4\pi\lambda}\exp\left(-\frac{r^2}{4at}\right), \qquad (5\text{-}11)$$

где θ — температура, °К; t — время, *сек*; q — количество выделенного тепла на единицу длины нагревателя, *дж/(м · сек)*; r — расстояние от

нагревателя, *м*; λ — коэффициент теплопроводности, *дж/(м · сек · °К)*; a — температуропроводность, *м²/сек*.

При этом были приняты нулевые начальные условия (при $t=0$, $\partial\theta/\partial t=0$), соответствующие стационарному состоянию. Если $m=4at/r^2>50$, правую часть уравнения (5-11) можно заменить величиной, к которой она асимптотически приближается при $m\to\infty$:

$$\frac{\partial\theta}{\partial \ln t}=\frac{q}{4\pi\lambda}. \qquad (5\text{-}12)$$

При условии $q=\text{const}$ угол наклона прямой $\theta(\lg t)$, построенной в полулогарифмических координатах, однозначно характеризует величину λ, а следовательно, и влажность материала.

В практической реализации метода датчик-зонд длиной 22 *см* имел 9 термопар, расположенных в непосредственной близости от проволочного нагревателя. Так как в реальных условиях начальные условия не соответствуют стационарному состоянию, применялся дифференциальный датчик, у которого холодные слои термопар находились во втором цилиндрическом корпусе, расположенном на расстоянии 15 *см* от корпуса с горячими спаями. Обе части датчика вводились в полости, высверленные в объекте измерения. Прибор применялся для исследования динамики увлажнения строительных конструкций и ограждений. Аналогичный зонд применялся для почв, причем наклон прямых $\theta(\lg t)$ характеризовал влажность почвы, не насыщенной влагой или пористость насыщениой.

Влажность широкого класса твердых материалов и жидкостей можно определять также по скорости охлаждения предварительно нагретого зонда, роль которого выполняет, например, чувствительный элемент термометрического датчика, нагреваемый до температуры $\theta_1=\theta_м+\Delta\theta$ ($\Delta\theta=\text{const}$, $\theta_м$ — температура образца материала) [Л 5-17]. В этой модификации метода регулярного теплового потока измеряемой величиной являлся интервал времени Δt, в течение которого термометр охлаждался до температуры $\theta_2=\theta_м+\Delta\theta/2$. При условии термического равновесия образца с окружающей средой результат измерения не зависит от изменений начальной температуры в широких пределах.

В приборе [Л. 5-18] результат измерения зависит от теплоемкости материала. Датчик представляет собой теплоизолирующий цилиндр, в полости которого установлен (по оси цилиндра) нитевидный термометр сопротивления и в центральном поперечном сечении — плоский электрический нагреватель. Исследуемый материал окружает внешнюю поверхность цилиндра и заполняет его полость. С помощью нагревателя кратковременно выделяют фиксированное количество тепла (тепловой импульс) и измеряют приращение температуры.

Теплофизические влагомеры отличаются простотой конструкции; их можно использовать для измерений в полевых и производственных условиях, а процесс измерения можно автоматизировать. При условии миниатюризации датчиков с их помощью можно определять не только интегральную влажность, но локальные значения, распределение влажности в объеме материала и т. д. К недостаткам следует отнести сильное влияние плотности материала, его гранулометрического состава и термического контакта с чувствительным элементом; наличие поверхностной влаги в зоне контакта может вызвать большие погрешности. Для выполнения измерения необходимы отбор пробы или введение датчика в массу материала. От этого метода

нельзя ожидать высокой точности; наиболее полезным его применением является контроль динамики влажности в массе материала с помощью «закладных» датчиков.

Ультразвуковые влагомеры основаны на зависимости характеристик ультразвуковых колебаний от свойств и состава среды, в которой распространяется ультразвук. Влагомеры этого типа появились в последние годы; в них обычно используется зависимость скорости распространения ультразвуковых колебаний от влагосодержания исследуемого материала. Приборы на принципе поглощения ультразвука имеют значительные дополнительные погрешности, связанные с изменением параметров генераторов, усилителей, излучателей и приемников ультразвука, а также различных параметров контролируемого объекта. Хотя эти погрешности можно уменьшить, применяя двухканальные дифференциальные схемы, приборы на принципе измерения скорости более точны. Как и другие ультразвуковые приборы, влагомеры могут работать в режиме непрерывного или импульсного излучения.

Для расчета скорости ультразвука в сложных гетерогенных системах, в том числе и влагосодержащих материалах, нет единых аналитических методов. Если рассматривать эти материалы как двухкомпонентные смеси (сухое вещество — вода) и исходить из гипотезы аддитивности адиабатических сжимаемостей, то близкой к экспериментальным данным будет зависимость [Л. 5-19]:

$$\frac{1}{v^2}=(1-\gamma_т)\frac{\rho}{\rho_в}\frac{1}{v_в^2}+\gamma_т\frac{\rho}{\rho_т}\frac{1}{v_т^2}, \qquad (5\text{-}13)$$

где v — скорость распространения ультразвука; γ — объемная доля компонента; ρ — плотность; индексы «т», «в» относятся к твердой фазе и воде, отсутствие индекса — к материалу в целом.

Для диапазона высокой влажности (у керамических масс при $W\geqslant 20\%$) справедливо неравенство

$$\beta_т\gamma_т\gg\beta_в(1-\gamma_т),$$

($\beta_т$, $\beta_в$ — сжимаемости твердой фазы и воды) и уравнение (5-13) примет вид:

$$v=\frac{\left[1+W\left(\frac{\rho_т}{\rho_в}-1\right)\right]v_в}{\frac{\rho_т}{\rho_в}\sqrt{W}}. \qquad (5\text{-}14)$$

Если выходной величиной ультразвукового преобразователя является время распространения импульса, зависимость измеряемого интервала времени Δt от скорости распространения ультразвука в контролируемой среде описывается выражением

$$\Delta t=B/v+2b/v_м+t_з,$$

где $v_м$ — скорость ультразвука в защитных мембранах датчика; B и b — акустический путь в контролируемой среде (базовое расстояние датчика) и в защитной мембране соответственно; $t_з$ — суммарная дополнительная задержка импульса в пьезовибраторах, электрических цепях и т. д.

В схемах ультразвуковых приборов применяется один совмещенный излучатель-приемник или два раздельных устройства. Ультразвуковые влагомеры отличаются высокими быстродействием и чувствительностью и благодаря применению защитных мембран могут работать в агрессивных средах. Основной недостаток ультразвукового метода заключается в зависимости результата измерения не только от измеряемой величины, но и от ряда влияющих параметров исследуемого материала. Влияние плотности вытекает непосредственно из (5-13); кроме того, существенное влияние оказывает химический состав, в частности содержание электролитов, а у сыпучих материалов и гранулометрический состав.

Наибольшее значение имеет температура окружающей среды; так, для суспензии с влажностью 40% температурная погрешность составляет около 0,8% H_2O на 1 *град*.

Ультразвуковые влагомеры применялись в небольших масштабах для керамических масс, растворов полимеров, ацетилцеллюлозы и



Рис. 5-9. Блок-схемы ультразвуковых влагомеров с непрерывным (*а*) и импульсным (*б*) излучением.

1 — генератор; *2* — датчик; *3* — эталон; *4* — фазометр; *5* — показывающий прибор; *6* — излучатель; *7* — контролируемая среда; *8* — приемник; *9* — усилитель; *10* — формирователь; *11* — измерительная схема.

уксусной кислоты и некоторых других материалов. В [Л. 5-19] для суспензий (шликеры керамического производства с влажностью 30—50%) был разработан влагомер на принципе непрерывного излучения (рис. 5-9,*а*). Генератор, стабилизированный кварцем, создает синусоидальное напряжение, подаваемое на двухканальную схему. Опорный канал содержит датчик, заполненный дистиллированной водой и выполняющий функции термокомпенсатора. Сигналы обоих каналов имеют фиксированные уровни; выходной величиной служит разность фаз этих сигналов, измеряемая фазометром с самопишущим выходным прибором. Для пластичных дисперсных керамических материалов с влажностью 15—30% применялся импульсный метод в сочетании с принципом автоциркуляции. Влагомер (рис. 5-9,*б*) содержит синхрокольцо: импульс генератора, пройдя через контролируемую среду, после усиления и формирования используется для нового запуска генератора, в результате чего создается непрерывная последовательность импульсов с частотой следования, которая определяется временем распространения импульса. Измеряемой величиной является интервал времени, кратный определенному целому числу периодов следования синхроимпульсов. Измерительная схема преобразует этот интервал времени в напряжение, характеризующее влажность материала и измеряемое выходным прибором.

Перейдем теперь к рассмотрению более старых, но менее распространенных электрических методов: метода э. д. с. гальванического элемента и метода статического электричества.

К некоторым материалам применим метод измерения влажности по величине э. д. с., возникающей при введении гальванической пары во влажный материал, или по внутреннему сопротивлению такого «гальванического элемента».

Модификацией рассматриваемого метода является измерение влажности почв по э. д. с. поляризации, возникающей на платиновых электродах, введенных в почву, после пропускания через них постоянного тока определенной силы. Этот принцип применен в влагомере «Днестр», предназначенном для определения влажности почвы перед ее поливом.

Преимуществом влагомеров рассмотренного типа являются крайняя простота и дешевизна; для работы некоторых из них не требуется даже источника тока, что делает их особенно удобными для измерений в полевых условиях. Однако эти влагомеры имеют очень низкую точность.

Влагомеры второго типа основаны на образовании электростатического электричества при трении о некоторые влагосодержащие материалы. Величина остаточного электрического заряда, измеряемая с помощью металлических электродов, трущихся о поверхность материала, равна разности заряда, генерированного трением, и утечки на землю. Последняя величина зависит от поверхностного сопротивления, а следовательно, и от влажности материала. Чем суше материал, тем больше при прочих равных условиях возникающий электростатический заряд; повышение влажности материала уменьшает величину заряда. Этот принцип нашел практическое применение для контроля влажности движущихся текстильных тканей и полуфабрикатов, а также других тонких листовых материалов. Электростатические влагомеры непригодны для точного определения влажности и могут применяться лишь в качестве грубых индикаторов степени увлажнения некоторых материалов.

Электрическим свойством материалов, реже других используемым в измерениях влажности, является электрическая прочность материала. Зависимость градиента потенциала, при котором происходит пробой, от влажности материала наиболее однозначна у жидких диэлектриков; на практике она используется для контроля увлажненности трансформаторного и других масел. Однако этот метод имеет ряд недостатков: применимость только при низких влагосодержаниях, загрязнение масла в результате измерения, непригодность для автоматического контроля.

5-4. МНОГОПАРАМЕТРИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ

Рассмотренные в предыдущих главах и параграфах методы измерения влажности можно применять и в сочетании друг с другом или с другими методами анализа состава и свойств вещества. Аналогичные «многопараметрические» методы используются в измерительной технике для получения информации о значениях нескольких параметров объекта анализа. Примером может служить определение n параметров многокомпонентного раствора

или смеси из системы уравнений, связывающих выходные величины средств измерения с искомыми параметрами. Эти методы применяются и в неразрушающих методах контроля продукции машиностроения и других отраслей промышленности [Л. 5-20].

При измерениях влажности многопараметрические методы представляют интерес как одно из направлений разделения полезного и мешающих сигналов. Обозначим через W влажность материала, а через $x_1, x_2, \ldots, x_n$ — другие параметры, характеризующие его состав и состояние. Применяя измерительные устройства, основанные на различных методах, или выполняя измерения одним методом, но при нескольких значениях параметра разделения (частота, фаза, уровень или форма сигнала и т. п.), можно получить систему из $n+1$ уравнений. В этих уравнениях y_i обозначает выходную величину i-го измерения, а F_i — заранее известную функцию преобразования для i-го метода измерения или i-го значения параметра разделения:

$$\left.\begin{aligned} y_1 &= F_1(W, x_1, x_2, \ldots, x_n);\\ y_2 &= F_2(W, x_1, x_2, \ldots, x_n);\\ &\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\\ y_{n+1} &= F_{n+1}(W, x_1, x_2 \ldots x_n). \end{aligned}\right\} \qquad (5\text{-}15)$$

При этом в отдельные уравнения могут входить разные сочетания неизвестных величин. Решение системы уравнений (5-15) позволяет определить все $n+1$ неизвестных: $W, x_1, x_2, \ldots, x_n$.

Вычислительное устройство многопараметрического влагомера выдает информацию о значениях W или о значениях W и дополнительно одного или нескольких параметров x.

Для практической реализации многопараметрических методов важное значение имеет оптимальный выбор измеряемых параметров объекта исследования или значений параметра разделения, сочетание которых обеспечивает максимальную точность определения искомых величин. Был предложен ряд критериев оптимальности сочетания; один из них сводится к минимизации числа обусловленности p матрицы коэффициентов в системе уравнений (5-15) [Л. 5-21]: $p=\lambda_{\text{макс}}/\lambda_{\text{мин}}$ ($\lambda_{\text{макс}}$ и $\lambda_{\text{мин}}$ — наибольшее и наименьшее собственные значения матрицы).

Вторым необходимым условием является повышение точности измерения используемых параметров, включающее уменьшение динамических погрешностей, вызванных различием динамических характеристик n каналов измерения. Практически точность каждого из каналов при многопараметрическом измерении должна быть выше, чем в одноканальных измерительных устройствах. Это обстоятельство наряду с усложнением и повышением стоимости измерительного устройства ограничивает применение многопараметрических методов во влагомерах. В большинстве случаев в них ограничиваются измерением лишь одной дополнительной величины.

Радиоизотопно-диэлькометрический метод для получения информации как о влагосодержании, так и о массовой толщине был разработан применительно к волокнистым материалам (штапельное и шерстяное волокно) [Л. 5-22]; предложенный автоматический влагомер имеет вычислительное устройство, состоящее из типовых аналоговых блоков и позволяющее непрерывно измерять влагосодержание и «сухой вес» волокна, перемещаемого на конвейере, без необходимости выравнивания и уплотнения движущегося слоя.

Другим примером может служить автоматический контроль влажности W и массы единицы площади B бумажного полотна, целлюлозы и картона в процессе их производства; влажность движущегося листового материала измеряет диэлькометрический влагомер с односторонним датчиком, величину B — бета-интенсиметр.

Наибольшее практическое применение нашло комбинирование радиометрических методов для одновременного измерения влажности и плотности материалов. Радиометрические влагомеры-плотномеры для почв и грунтов применяются в строительстве шоссейных и железных дорог, аэродромов, в инженерной геологии, гидромелиорации и почвоведении. Эти приборы основаны на методах, рассмотренных в § 5-1. Для измерения влажности используется, как правило, нейтронный метод, для измерения плотности — методы ослабления гамма-излучения, рассеяния этого излучения (гамма-гамма-метод) или их сочетание.

Совмещенные почвенные влагомеры-плотномеры рассчитаны на работу в полевых условиях. В одном корпусе объединяются датчики (зонды) влажности и плотности; обычно используется общий регистратор импуль-

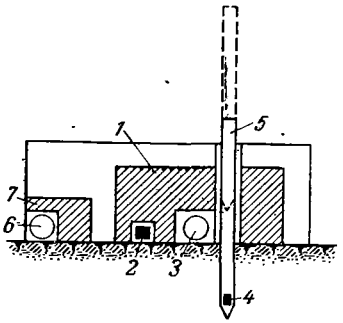


Рис. 5-10. Датчик радиоизотопного плотновлагомера для грунтов.

сов для обоих каналов. Некоторые конструкции дают возможность выполнения как поверхностных, так и глубинных измерений; штанговый датчик такого типа показан на рис. 5-10.

В свинцовом контейнере *1* содержатся источник нейтронов *2* и пропорциональный счетчик медленных нейтронов *3*, нечувствительный к гамма-лучам. Гамма-излучатель *4* закреплен на конце заостренного стального штока *5*; счетчик гамма-излучений *6* защищен свинцовым экраном *7*. Шток *5* может находиться в одном из двух фиксированных положений. При поднятом штоке гамма-излучатель находится в контейнере и плотность почвы измеряют по рассеянному гамма-излучению. При введении штока в почву ее плотность измеряют тем же детектором, но уже по ослаблению гамма-излучения. Влажность почвы измеряют нейтронным методом. (Ra+Be)-излучатели могут служить в рассматриваемых приборах источником как нейтронов, так и гамма-излучения, однако такие излучатели требуют тяжелых защитных устройств. Поэтому используют для обоих каналов раздельные излучатели: источник нейтронов с малым собственным гамма-излучением, например (Am+Be), гамма-излучатель с изотопом Cs^{137}. Детекторы медленных нейтронов и гамма-излучений применяются тех же типов, что и в нейтронных влагомерах и гамма-плотномерах. Известны приборы с одним совмещенным детектором-сцинтилляционным счетчиком; избирательность измерения (раздельное определение плотности тепловых нейтронов и интенсивности рассеянного гамма-излучения) достигается амплитудной дискриминацией импульсов в регистрирующем устройстве. Информацию о значениях объемной влажности $W_{об}$ и плотности ρ материала можно использовать для непрерывного вычисления его массовой влажности $W = W_{об}/\rho$.

Наиболее распространенную разновидность многопараметрических методов измерения влажности составляют многочастотные методы, основанные на из-

мерении параметров одного и того же образца одним методом, но в различных участках спектра электромагнитных колебаний, т. е. при различных длинах волны. К этой категории можно отнести, например, измерения с помощью двухволновых инфракрасных влагомеров (§ 5-3); наибольшее развитие получили многочастотные методы с применением диэлькометрических влагомеров.

Согласно общей теории многочастотных методов [Л. 5-23] измерение на n частотах позволяет исключить влияние n—1 возмущающих воздействий. На практике, однако, ограничиваются наиболее простыми измерениями на двух частотах («двухчастотные» влагомеры) или значительно реже на трех, т. е. компенсацией одной или максимум двух наиболее существенных помех.

Минимизация общей погрешности влагомера должна служить основным критерием выбора рабочих частот f многочастотного влагомера. Ввиду отсутствия аналитических зависимостей, связывающих диэлектрические свойства влагосодержащих материалов с влажностью и возмущениями x_i, выбор рабочих частот приходится базировать на экспериментальных характеристиках $y=F(W, x_i, f)$ данного материала, описывающих зависимость выходного сигнала y датчика от влажности и от выбранного компенсируемого возмущения x_i. В многочастотных влагомерах используются те же величины y, что и в обычных диэлькометрических приборах: полное сопротивление датчика, его реактивная или активная составляющая, сила тока через датчик и т. д.

В ряде работ, например [Л. 5-24], даны графоаналитические способы оптимального выбора частот для двухчастотных влагомеров, основанные на анализе семейства характеристик $y=F(W, x_i, f)$. Все они основаны на критерии максимума полезной информационной мощности в используемом сигнале: при одной из частот должна быть максимальной чувствительность к влажности $S_W=\partial y_в/\partial W$ при минимальной чувствительности к помехе $S_x=\partial y_в/\partial x_i$, при второй частоте соотношение S_W и S_x должно быть противоположным ($y_в$ — выходной сигнал измерительного устройства).

В табл. 5-1 приведены данные, характеризующие двухчастотные диэлькометрические влагомеры, разработанные в СССР и США (фирмой Industrial Nucleonics Corporation, получившей в 1960—1970 гг. большое число патентов на двухчастотные влагомеры [Л. 5-25]).

Таблица 5-1

Объект измерения	Компенсируемый параметр	Рабочие частоты, *Мгц*		Автор
		f_1	f_2	
Зерно, чай	Плотность	0,5	20	Джемелла
То же	Температура, сорт, натура	7	45	Гветадзе Дубров
Формовочные литейные смеси	Плотность и содержание глины	0* 5,5	26* 26	Протодьяконов
Нефть	Плотность	5,0	9 200	Пустынников и Джабраилов
Шерсть, текстильные ткани	Температура, содержание электролитов	0,001	0,05	Walls
Бумажное полотно	Массовая толщина	0,1	0,5	Baird
То же	То же	0,001—0,005	0,1—0,5	Byrd

* При содержании глины меньше 0,5%.

Обобщенная структурная схема двухчастотного влагомера (рис. 5-11,*а*) содержит датчик *Д*, два измерительных канала $И_1$ и $И_2$, вычислительное устройство *В* и выходной прибор *П*; каналы $И_1$ и $И_2$ работают на частотах f_1, f_2 ($f_1 \neq f_2$). Выходной сигнал вычислительного устройства может формироваться в результате выполнения разных математических операций над сигналами обоих каналов: $y_в = F_1(y_1 - y_2)$; $y_в = F_2(y_1/y_2)$; $y_в = F_3(\lg y_1/\lg y_2)$; $y_в = F_4[(y_1 - y_2)/y_2]$ и т. д. (F_1—F_4 — функция преобразования, обычно линейная). Практическая реализация рассмотренной структуры во многом зависит от диапазона частот, которым соответствуют f_1 и f_2; на рис. 5-11,*б* приведена блок-схема автоматического двухчастотного влагомера Ind. Nucleonics Corp. (рабочие частоты 100 и 530 *кгц*). Генераторы низкой частоты f_1 и высокой f_2 питают схему сравнения *С*, в которую включен емкостный датчик *А* (для бумажного полотна — односторонний датчик с внешним полем и заземленным защитным электродом). Блок *С* выполнен в виде четырехплечего моста; суммирующий усилитель $У_I$ подает на датчик напряжение в противофазе с напряжением питания моста. В других модификациях *С* — это мост с тесной индуктивной связью двух плеч или емкостный делитель напряжения, одно плечо которого образует датчик. Мост уравновешивают при отсутствии материала в поле датчика. Сигнал разбаланса моста, усиленный выходным усилителем $У_{II}$, поступает на два контура, содержащих фильтры ($Ф_1$, $Ф_2$) соответствующей частоты и демодуляторы ($Д_1$, $Д_2$). Детектированные сигналы обоих каналов поступают в аналоговое вычис-

лительное устройство *ВУ* с выходным самопишущим прибором *П*. Блок *ВУ* реализует необходимое соотношение между выходным напряжением и детектированными сигналами; он содержит функциональный преобразователь, позволяющий линеаризовать шкалу выходного прибора в единицах влажности. Непрерывное автоматическое уравновешивание схемы осуществляется с помощью следящей системы, в которую входят дифференциальный усилитель $У_{Ш}$ и реверсивный исполнительный двигатель $Р$, перемещающий ползунок потенциометра R, т. е. изменяющий выходное напряжение генератора $Г_1$. Такой способ уравновешивания возможен благодаря тому, что изменение полной проводимости датчика на низкой частоте (f_1) значительно больше, чем на высокой (f_2). В других вариантах схемы уравновешивающий элемент (конденсатор переменной емкости или варикап) включен в плечо моста или делителя напряжения.

Наряду с частотным принципом разделения информации можно использовать и другие. В качестве параметра разделения можно выбрать любую физическую величину, не зависящую от влажности и позволяющую получить систему уравнений (5-15). Параметром разделения может служить, например, температура («двухтемпературный» метод нашел применение для контроля увлажнения изоляции трансформаторов и электрических машин), однако удобнее изменять электрические пара-

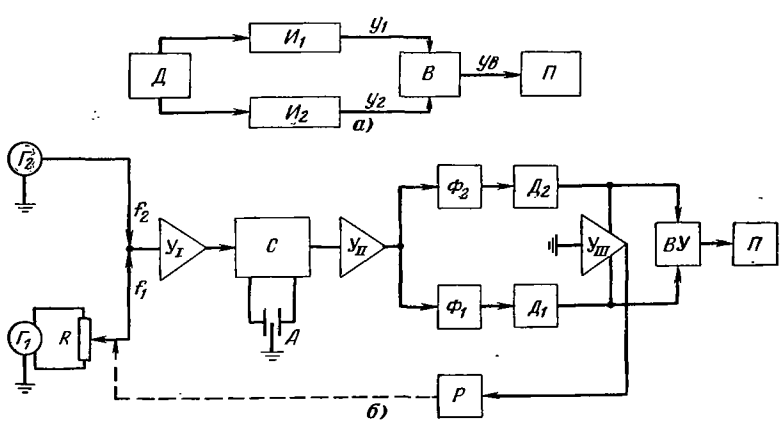


Рис. 5-11. Схемы двухчастотных влагомеров.

метры. Фазовое разделение реализуется во влагомерах с фазовращателями и фазочувствительным детектором, например в приборе, предложенном Л. Гартшорном [Л. 5-26].

«Амплитудно-фазовое» разделение по соотношению между активной и реактивной составляющими комплексного сопротивления датчика возможно, если измерительная схема влагомера позволяет измерять эти обе составляющие. В патентной литературе описан ряд схем, в которых вычислительное устройство определяет отношение сигналов, характеризующих активную и емкостную составляющие полного сопротивления датчика; выходной сигнал вычислительного устройства является функцией влажности исследуемого материала и не зависит от его плотности или «сухой массы», неравномерности распределения влаги в нем и т. п. Примером может служить диэлькометрический автоматический влагомер [Л. 5-27б]. Эти устройства являются одночастотными, причем рабочая частота выбирается из соображений оптимального отношения чувствительностей к влажности и к компенсируемой помехе. Дополнительные возможности открывает сочетание амплитудно-фазовой селекции с частотной. Измеряя активное и реактивное сопротивления датчика на двух разных частотах, можно получить четыре уравнения и исключить влияние уже не одной, а двух или даже трех мешающих величин; описанный принцип реализован в [Л. 5-27а]. Более простая модификация рассматриваемого комбинированного способа разделения заключается в измерении на одной частоте активной составляющей проводимости датчика, а на второй — реактивной. Следует отметить, что последние способы разделения почти не нашли практического применения; достаточно ограничено также применение двухчастотных влагомеров.

ЧАСТЬ ВТОРАЯ

ИЗМЕРЕНИЯ ВЛАЖНОСТИ ГАЗОВ

Глава шестая

ВЛАЖНОСТЬ ГАЗОВ. МЕТОДЫ И ЕДИНИЦЫ ИЗМЕРЕНИЯ

6-1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ. ЕДИНИЦЫ ИЗМЕРЕНИЯ ВЛАЖНОСТИ ГАЗОВ

В гигрометрии объектами измерения являются содержащие влагу (влажные) газы, воздух и газовые смеси. Влажный незагрязненный воздух можно рассматривать как бинарную смесь сухого воздуха и водяного пара, для которой характерны изменения содержания водяного пара в очень широких пределах (для атмосферного воздуха от $2 \cdot 10^{-6}$ до 4—5% объемных). Критические температуры $T_к$ всех газов, входящих в состав атмосферного воздуха, очень низки. Как известно, при температуре выше критической ($T > T_к$) газ может находиться только в газообразном состоянии при любых значениях давления. Чем выше температура газа по сравнению с критической и чем меньше его давление по сравнению с давлением насыщения, тем ближе газ по своим физическим свойствам к идеальному газу. Поэтому при обычных температурах и давлениях влажные газовые смеси и воздух, а также их компоненты с точностью, достаточной для большинства практических задач, подчиняются законам идеальных газов:

а) закону парциальных давлений Дальтона:

$$p = \sum_{i=1}^{k} p_i,$$

где p — общее давление газа; k — общее число компонентов смеси идеальных газов; p_i — парциальное давление i-го компонента.

Согласно этому закону полное (барометрическое) давление воздуха:

$$p = p_с + e,$$

где $p_с$, e — парциальные давления, соответственно сухого воздуха и водяного пара.

б) уравнению состояния идеального газа:

$$p_i V_i = R_i T_i,$$

где p_i, V_i, T_i — давление, объем и термодинамическая температура (°К) газа; R_i — удельная газовая постоянная i-го газа.

Удельная газовая постоянная связана с универсальной газовой постоянной R соотношением $R_i = R/M_i$ (M_i — молекулярная масса i-го газа). Значения удельной газовой постоянной равны: для сухого воздуха $R_с = 287$ $м^2/(сек^2 \cdot град)$, для водяного пара $R_п = 461$ $м^2/(сек^2 \cdot град)$, для влажного воздуха $R_в$ зависит от его влажности.

В действительности воздух и газовые смеси представляют собой неидеальные газы, отклонение свойств которых от свойств идеального газа в общем увеличивается с понижением температуры и повышением давления. Уравнение состояния чистого реального газа можно записать в виде [Л. 6-1]

$$pV/RT = Z(p, T),$$

где Z — коэффициент сжимаемости, являющийся функцией давления p и температуры T. Эту функцию описывает вириальное уравнение состояния:

$$pV/RT = 1 + B/V + C/V^2 + D/V^3 + \ldots,$$

где B, C, D — соответственно второй, третий, четвертый и т. д. вириальные коэффициенты, характеризующие отклонения от уравнения состояния идеального газа вследствие взаимодействия между парами, тройками, четверками и т. д. молекул. Коэффициенты B, C, D ... являются функциями только температуры T и химической природы данного газа; их определяют теоретическим расчетом или экспериментом. Характеристики влажного воздуха, рассчитанные по вириальному уравнению, имеют отклонения от значений, полученных для идеальных газов; в обычных условиях эти отклонения незначительны.

Некоторые величины, характеризующие влажность газов (гигрометрические характеристики), связаны с упругостью насыщения (максимальной упругостью) E, которая характеризует состояние насыщения газа водяным паром. При температурах ниже критической (для воды $T_к = 647{,}30$ °К $= +374{,}15$ °С) вода может содержаться в газе в трех фазах: жидкой, газообразной (в виде водяного пара) и твердой (лед). Тройная точка воды на фазовой диаграмме, соответствующая равновесию всех трех фаз, имеет координаты $T_0 = 273{,}16$ °К ($t_0 = +0{,}01$ °С) и $p_0 = 610{,}6$ $н/м^2$ (6,1114 $мбар$). В этой точке упругость насыщения над водой и льдом одинакова и равна p_0. Для гигрометрии важно то, что при температурах ниже T_0 водяной пар может находиться в динамическом равновесии с водой или со льдом. При данном значении температуры $T < T_0$ приходится рассматривать насыщение относительно воды и относительно льда, причем значение максимальной упругости водяного пара относительно плоской поверхности чистой переохлажденной воды ($E_в$) больше этой упругости относительно чистого льда ($E_л$), т. е. $E_в > E_л$.

Упругости насыщения $E_в$ и $E_л$ являются функциями температуры T и давления p газа; при давлениях ниже 10 $кгс/см^2$ их можно рассматривать как функции одной переменной T. Для описания функций $E_в(T)$ и $E_л(T)$ были предложены многочисленные формулы.

Некоторые из них основаны на уравнении Клаузиуса — Клапей-

рона, которое для перехода вода⇄водяной пар имеет вид:

$$\frac{dE}{E}=\frac{L}{AR_{\text{п}}}\frac{dT}{T^2}=\frac{L}{k}\frac{dT}{T^2}, \tag{6-1}$$

где L — удельная скрытая теплота парообразования; $k=AR_{\text{п}}$ — постоянная (A — термический эквивалент работы, $R_{\text{п}}$ — удельная газовая постоянная водяного пара).

Интегрирование (6-1) дает (если считать $L=\text{const}$)

$$\ln\frac{E}{E_0}=\frac{L}{k}\left(\frac{1}{T_0}-\frac{1}{T}\right), \tag{6-2}$$

где E_0 — упругость насыщения при температуре T_0. Более точная формула учитывает зависимость L от температуры t:

$$L=L_0+(c_{p\text{п}}-c_{\text{в}})t,$$

где L_0 — значение L при $t=0$ °С; $c_{p\text{п}}$ — удельная теплоемкость водяного пара при постоянном давлении; $c_{\text{в}}$ — удельная теплоемкость воды. Величины $c_{p\text{п}}$ и $c_{\text{в}}$ можно считать не зависящими от температуры.

Формулу (6-1) можно применить и для вычисления $E_{\text{л}}$ при условии замены в ней L на $L_{\text{с}}$ — удельную скрытую теплоту сублимации (перехода: лед⇄водяной пар).

На практике обычно пользуются эмпирическими зависимостями $E(T)$. Одна из наиболее распространенных (формула Магнуса) имеет следующий вид:

$$E=E_0 10^{\frac{at}{b+t}},$$

где t — температура, °С; a, b — постоянные, имеющие неодинаковое значение для $E_{\text{в}}$ и $E_{\text{л}}$.

Значения постоянных a, b, а также ряд других эмпирических формул для расчета $E_{\text{в}}$ и $E_{\text{л}}$ приведены в [Л. 0-9]. Всемирная метеорологическая организация (ВМО) рекомендовала в 1961 г. в качестве наиболее точных следующие формулы:

для воды при температурах от —50 до +100 °С:

$$\lg E_{\text{в}}=10{,}79574\,(1-T_0/T)-5{,}02800\lg(T/T_0)+$$
$$+1{,}50475\cdot10^{-4}\,[1-10^{-8{,}2969(T/T_0-1)}]+$$
$$+0{,}42873\cdot10^{-3}\,[10^{4{,}76955(1-T_0/T)}-1]+0{,}78614; \tag{6-3}$$

для льда при температурах от —100 до 0 °С:

$$\lg E_{\text{л}}=-9{,}09685\,(T_0/T-1)-3{,}56654\lg(T_0/T)+$$
$$+0{,}87682\,(1-T/T_0)+0{,}78614,$$

($E_{\text{в}}$ и $E_{\text{л}}$ — в миллибарах).

Рассчитанные по этим формулам значения $E_{\text{в}}$ и $E_{\text{л}}$ [Л. 6-2] приведены в табл. 6-1.

Таблица 6-1

Упругость насыщенного водяного пара в равновесии с водой ($E_в$) или льдом ($E_л$)

Температура, °С	—90	—80	—70	—60
$E_в$, *мбар*	—	—	$4{,}919 \cdot 10^{-3}$	$1{,}897 \cdot 10^{-2}$
$E_л$, *мбар*	$-9{,}665 \times 10^{-5}$	$5{,}468 \cdot 10^{-4}$	$2{,}614 \cdot 10^{-3}$	$1{,}080 \cdot 10^{-2}$

Температура °С	—50	—40	—30	—20	—10	0
$E_в$, *мбар*	$6{,}354 \times 10^{-2}$	$1{,}891 \times 10^{-1}$	0,509	1,254	2,862	6,107
$E_л$, *мбар*	$3{,}933 \times 10^{-2}$	$1{,}283 \times 10^{-1}$	0,380	1,032	2,597	6,106

Продолжение

Температура, °С	+10	+20	+30	+40
$E_в$, *мбар*	12,27	23,37	42,43	73,77

Температура, °С	+50	+60	+70	+80	+90	+100
$E_в$, *мбар*	123,39	199,25	311,68	473,66	701,13	1013,25

Для количественной оценки влажности газов используется целый ряд характеристик, причем в определенных областях науки и техники находят преимущественное применение те или иные из них. Гигрометрические характеристики можно разделить на следующие группы:

а) Величины, характеризующие концентрацию водяного пара

1. Абсолютная влажность a, т. е. масса водяного пара, содержащаяся в единице объема газа; обычно a выражают в $г/м^3$. Абсолютная влажность имеет тот же физический смысл, что и плотность водяного пара $\rho_п$, выражаемая обычно в $г/см^3$.

2. Упругость или парциальное давление водяного пара e, выражаемое в единицах давления — в *мм рт. ст.*, а в метеорологии — в миллибарах. При данной темпера-

туре T значения упругости водяного пара могут изменяться в пределах от 0 до E; для пересыщенного газа возможно $e>E$.

б) Характеристики влажностных отношений

3. Влагосодержание (отношение смеси) d, т. е. отношение массы водяного пара к массе сухого газа в том же объеме, выраженное в безразмерных единицах (*г/г* или *кг/кг*). Эту величину можно также рассматривать как отношение плотности водяного пара к плотности сухого газа в одинаковых условиях. Реже используется отношение массы водяного пара к массе влажного газа, именуемое удельной влажностью. Эта величина, обозначаемая q, выражается в тех же единицах, что и влагосодержание d.

4. Объемное влагосодержание x, равное отношению объема водяного пара к объему газа. Эту безразмерную величину можно выразить по отношению к объему сухого или объему влажного газа; в первом случае будем ее обозначать через x_0, во втором — x.

Влагосодержание и объемное влагосодержание используют для характеристики весьма малых содержаний водяного пара. В этом случае удобной единицей измерения является миллионная доля (м. д. — международное обозначение *ppm*): 1 м. д. $=10^{-6}=10^{-4}\%$. В иностранной литературе эту единицу измерения влагосодержания часто обозначают ppm_w (м. д. массовая), а долю объемного влагосодержания — ppm_v (м. д. объемная).

5. Молярная доля водяного пара s, равная отношению числа молей водяного пара к общему числу молей влажного газа.

в) Температура точки росы[1]

6. По определению, принятому ВМО, термодинамическая температура точки росы (льда) $\tau_в(\tau_л)$ влажного воздуха при давлении p и отношении смеси d есть температура, при которой влажный воздух, насыщенный по отношению к воде (льду) при том же давлении p, имеет отношение смеси, равное данному отношению смеси d. Следовательно, точка росы (льда) равна температуре, которую примет влажный газ, если охладить его изобарически до полного насыщения по отношению к плоской

[1] В литературе распространено сокращение «точка росы»; точку льда иногда называют точкой инея.

поверхности воды (льда). При одном и том же состоянии влажного воздуха, у которого $\tau_л < 0$ °С, точка росы всегда ниже точки льда $\tau_в < \tau_л$.

г) Относительная влажность

7. Относительная влажность φ равна отношению действительной влажности газа к его максимальной возможной влажности, соответствующей насыщению при данной температуре. Следовательно, величина φ характеризует степень насыщения газа водяным паром и в связи с этим находит применение во многих отраслях науки и техники. Величина абсолютной влажности при постоянной относительной влажности является функцией температуры. Относительная влажность выражается в относительных единицах ($0 \leqslant \varphi \leqslant 1$) или в процентах ($0 \leqslant \varphi \leqslant 100\%$). Ее можно вычислить с помощью различных, рассмотренных выше характеристик влажности. По последнему определению ВМО относительная влажность (φ_s) выражается отношением молярной доли водяного пара исследуемого воздуха к молярной доле при насыщении воздуха по отношению к воде (льду) при тех же значениях температуры и давления. Кроме того, значение φ можно вычислить по отношениям следующих величин для исследуемого и насыщенного воздуха: абсолютной влажности a, упругости e, отношения смеси d и удельной влажности q. Соответствующие численные значения (обозначим их φ_a, φ_e, φ_d, φ_q) будут несколько отличаться друг от друга. Относительная влажность связана с температурой точки росы τ и температурой газа t ($t \geqslant \tau$) соотношением

$$\varphi = \frac{E_\tau}{E_t}, \qquad (6\text{-}4)$$

где E_τ — упругость насыщенного пара при температуре τ; E_t — упругость насыщенного пара при температуре t. На практике для вычисления относительной влажности чаще всего используют значения упругости насыщенного пара E, полученные из справочных таблиц или диаграмм. В дальнейшем, если не будет особых оговорок, примем:

$$\varphi, \%_0 = \varphi_e \%_0 = \frac{e}{E} 100 = \varphi_s 100.$$

При температурах ниже 0 °С эту величину можно определять для водяного пара в равновесии с водой ($\varphi_в$)

или льдом ($\varphi_л$). Так как для одной и той же температуры $E_в > E_л$, то всегда $\varphi_в < \varphi_л$. Общепринятым является определение относительной влажности при любых температурах по $E_в$; ниже, при отсутствии оговорок, подразумевается $\varphi = \varphi_в$.

Приведенный перечень не охватывает некоторых менее употребляемых величин, например: дефицит влажности D (недостаток насыщения) — разность (при данном состоянии газа) максимальной возможной и действительной упругостей газа $D = E - e$, причем в отношении выбора величины E остаются в силе соображения, высказанные для относительной влажности; дефицит точки росы — разность температур газа и его точки росы; осажденный слой воды — см. § 9-2. Однако наличие даже шести-семи характеристик, выраженных различными единицами измерения, вызывает существенные неудобства. В частности, это обстоятельство препятствует унификации гигрометров — существующие приборы имеют шкалы, градуированные в разных единицах.

Поэтому вполне закономерны попытки сокращения числа гигрометрических характеристик и выделения одной из них в качестве основной (базовой). Критериями для сравнительной оценки различных характеристик являются простота расчета или получения данных, возможность создания инструментальных средств измерения и область применения, в частности наличие приложений, где эта характеристика является единственно возможной. Важнейшее качество характеристики — ее консервативность, т. е. сохранение при различных процессах. С этой точки зрения в США в качестве базовой величины выбрано отношение смеси d. При пользовании этой характеристикой отпадает необходимость указания температуры и давления газа, при которых определялось значение d. Кроме того, предлагалось [Л. 6-3] сохранить относительную влажность и точку росы. Последние две характеристики позволяют вычислить и упругость водяного пара.

Зависимости, связывающие различные гигрометрические характеристики, легко вывести на основе свойств идеального газа. При этом переход от параметров газа $p_1 T$ к p_0, T_0 выполняется из условия: $V_0 = V \frac{p}{p_0} \frac{T_0}{T}$. Например, значение абсолютной влажности, отнесенное к газу при $T_0 = 273°K$ и $p_0 = 760$ *мм рт. ст.*,

равно: $a_{\text{н}} = a\frac{p_0}{p}\frac{T}{T_0}$. На основании закона Дальтона давление сухого газа $p_{\text{с}}$ определяем из выражения $p_{\text{с}} = p - e$, причем $e = s_{\text{п}} p$ и $p_{\text{с}} = s_{\text{с}} p$ ($s_{\text{п}}$, $s_{\text{с}}$ — молярные доли водяного пара и сухого газа).

Уравнение состояния идеального газа можно записать в следующем виде:

для водяного пара

$$eV = \frac{m_{\text{н}}}{M_{\text{п}}} RT;$$

для сухого газа

$$(p - e)V = \frac{m_{\text{с}}}{M_{\text{с}}} RT,$$

где m, M — масса и молекулярная масса, а индексы «п» и «с» относятся к водяному пару и сухому газу.

Отношение молекулярных масс водяного пара и сухого газа, равное отношению их плотностей $\rho_{\text{п}}/\rho_{\text{с}}$, обозначим $\gamma = M_{\text{п}}/M_{\text{с}} = \rho_{\text{п}}/\rho_{\text{с}}$; для воздуха принимаем $\gamma = 0{,}62198$ (в расчетах $\gamma = 0{,}622$).

В табл. 6-2 приведены основные характеристики влажности и соотношения между ними, рассчитанные на основании приведенных уравнений.

6-2. ОБЗОР И КЛАССИФИКАЦИЯ МЕТОДОВ ИЗМЕРЕНИЯ ВЛАЖНОСТИ ГАЗОВ

В настоящее время нет универсального метода измерения влажности газов, удовлетворяющего всем разнообразным требованиям, предъявляемым к этим измерениям. Известны и нашли применение многочисленные (несколько десятков) методы, основанные на различных принципах. Наибольшее практическое значение имеют следующие из них:

1) психрометрический, основанный на измерении температур двумя термометрами: «сухим» (обыкновенным) и «мокрым», имеющим чувствительный элемент, смоченный водой, и находящимся в термодинамическом равновесии с окружающей газовой средой. Испарение с поверхности чувствительного элемента мокрого термометра происходит тем интенсивнее, чем ниже влажность газа; разность показаний сухого и мокрого термометров зависит, следовательно, от значения влажности;

2) точки росы, заключающийся в определении температуры, до которой необходимо охладить (при неизменном давлении) ненасыщеный газ для того, чтобы довести его до состояния насыщения. Практически температура точки росы определяется по началу конденсации водяного пара на плоской поверхности твердого тела (металлического зеркальца и т. п.), охлаждаемой в атмосфере влажного газа.

Таблица 6-2

Основные характеристики влажности газов и соотношения между ними

Характеристика и ее выражение	Соотношения с другими характеристиками	Единица измерения
Абсолютная влажность $a = \frac{m_п}{V}$ Упругость водяного пара $e = R_п \rho_п T$	$a = 10^6 \rho_п$ $a = 289 \frac{e}{T}$ $a = 217 \frac{e}{T}$	a — $г/м^3$ $\rho_п$ — $г/см^3$ e — $мм\ рт.\ ст.$ T — °K e — $мбар$
Влагосодержание (отношение смеси) $d = \frac{m_п}{m_с}$ Удельная влажность $q = \frac{m_п}{m}$	$d = \gamma \frac{e}{p - e}$ $q = \frac{d}{1 + d} = \gamma \frac{e}{p - (1 - \gamma) e}$	d — кг/кг q — кг/кг e, p — в одинаковых единицах
Влагосодержание в миллионных долях: массовое $x_м = \frac{m_п}{m_с} 10^6$ объемное $x_0 = \frac{V_п}{V_0} 10^6$ объемное по отношению к влажному газу $x = \frac{V_п}{V} 10^6 = \frac{V_п}{V_п + V_с} 10^6$	$x_м = d 10^6$ $x_0 = \frac{d}{\gamma} 10^6 = \frac{e}{p - e} 10^6 = \frac{x_м}{\gamma}$ $x = q 10^6$ $x = \frac{x_0}{1 + x_0}$	$x_м$ — м. д. x_0, x — м. д. d — кг/кг q — кг/кг e, p — в одинаковых единицах
Молярная доля водяного пара $s = \frac{N_п}{N} = \frac{N_п}{N_п + N_с}$	$s = \frac{e}{p} = \frac{d}{\gamma + d}$	e, p — в одинаковых единицах
Относительная влажность $\varphi = \varphi_с = \varphi_s = \frac{e}{E}$	———	φ — в безразмерных единицах
Температура точки росы (льда): $\tau_в$ ($\tau_л$)	$e = E(\tau)$	τ — °K

Обозначения: m — масса; V — объем; p — давление; T — термодинамическая температура Кельвина; ρ — плотность; N — число молей; E — упругость насыщенного водяного пара; $\gamma = M_п / M_с$ (M — молекулярная масса), для воздуха $\gamma = 0.622$, $1/\gamma = 1{,}61$; $R_п$ — удельная газовая постоянная водяного пара.

Индексы: „п" — водяного пара; „с" — сухого газа (отсутствие индекса у m, V, p, ρ, N означает, что величина относится ко всему влажному газу).

Родственный метод основан на применении электролитических подогревных датчиков. Температуру точки росы определяют, подогревая до достижения равновесного состояния насыщенный солевой раствор, покрывающий чувствительный элемент температурного преобразователя;

3) сорбционный, основанный на применении гигроскопических тел, свойства которых изменяются в функции количества поглощенной влаги. В зависимости от использованного для измерения параметра влагочувствительного материала можно различить сорбционные гигрометры деформационные, электрические, весовые, цветовые и др.; наибольшее практическое значение имеют первые две группы.

В сорбционных гигрометрах деформационного типа используется свойство некоторых гигроскопических твердых материалов изменять свои линейные размеры в функции влажности окружающего воздуха. К наиболее старым и распространенным до настоящего времени приборам этого типа относятся волосные гигрометры; в них чувствительным элементом служит пучок обезжиренных человеческих волос. Кроме того, вместо волосных гигрометров нашли некоторое применение приборы с использованием животной пленки, обладающей сравнительно небольшим коэффициентом инерции. Этим преимуществом обладают также гигрометры с вальцованием (сплющенным при помощи вальцов) человеческим волосом. В некоторых гигрометрах применяются чувствительные элементы из капроновой нити, целлофана и других материалов.

Приборы этого типа отличаются простотой конструкции. Однако их инерционность возрастает с понижением температуры и относительной влажности; постоянная времени при десорбции чувствительного элемента больше, чем при увлажнении. Стабильность показаний этих гигрометров невысока, и им присуще явление гистерезиса. Недостатком волосного гигрометра является также незначительность усилий, которыми можно нагружать его чувствительный элемент. Это затрудняет оснащение гигрометров данного типа электрическими преобразователями (омическими, индуктивными и т. п.) для дистанционных измерений и автоматического контроля. В связи с этим гигрометры деформационного типа имеют сейчас ограниченную область применения: метеорологические измерения, контроль влажности воздуха в помещениях, грубые регуляторы влажности воздуха в помещениях. Но и в этих областях они вытесняются другими, более совершенными приборами.

У электрических гигрометрических датчиков используется зависимость электрических свойств чувствительного элемента от влажности окружающей среды. Из них следует выделить кулонометрические датчики, в которых происходит непрерывный электролиз поглощенной влаги.

В сорбционно-термическом методе измеряется количество тепла, выделяемое при сорбции влаги сухим гигроскопическим материалом или (значительно реже) серной кислотой.

Из других, менее распространенных методов измерения влажности газов заслуживают внимания седующие:

1. Метод полного поглощения, основанный на пропускании определенного объема газа через вещество, способное поглощать водяной пар, и оценке изменения параметров этого вещества в результате полного поглощения влаги. Известны две разновидности метода: гравиметрическая и химическая. В первой влагосодержание

воздуха определяют по приросту в весе поглотителя. Химические методы основаны на химической реакции поглотителя с влагой исследуемого газа. К наиболее известным относятся методы: газометрический и титрования реактивом Фишера (см. § 1-3). В ацетиленовом методе используется реакция водяного пара с карбидом кальция с выделением ацетилена, а в гидридном — с гидридом кальция с выделением водорода; эти методы мало распространены. При применении метода Фишера анализируемый газ поступает в реакционный сосуд, где барботируется через реактив до окончания титрования, фиксируемого электрометрическим или иным способом. Влагосодержание газа определяют по объему прошедшего газа и количеству реактива в сосуде.

Методы полного поглощения можно рассматривать как абсолютные, и их точность в принципе высока; практически она ограничена погрешностями измерительных операций (взвешивание поглотителя, измерение количества газа) и наличием примесей в газе и используемых реактивах. Процесс измерения длителен и трудоемок, в связи с чем эти методы используются только в качестве лабораторных. Гравиметрический метод поглощения применяют в качестве наиболее точного образцового при градуировке и испытаниях гигрометров (см. § 11-2); такие же функции возлагаются на метод Фишера в области весьма малых влагосодержаний.

2. Конденсационно-сгустительный метод, в котором исследуемый газ охлаждается в холодильнике до полной конденсации содержащейся в нем влаги. Количество последней определяют измерением количества газа и объема воды, выделившейся в холодильнике. Конденсационный метод, как и метод полного поглощения, является абсолютным, одним из его преимуществ является возможность определения влажности газов при высоких температурах.

3. Диффузионный метод, основанный на явлении диффузии газов через пористую перегородку. В диффузионных гигрометрах измеряется разность давлений контролируемой внешней среды и газа в камере, отделенной от этой среды пористой мембраной. В камере с помощью увлажнителя или осушителя поддерживается определенная величина упругости водяных паров.

Отдельную группу образуют методы, основанные на непосредственном измерении физических свойств газа, изменяющихся в функции влажности; достоинствами этих методов являются пригодность для автоматизации измерений и безынерционность функции преобразования. К ним относятся диэлькометрический метод и его разновидность — измерение диэлектрических свойств газа на сверхвысоких частотах (СВЧ рефрактометрия), поглощения инфракрасных, ультрафиолетовых и радиоизотопных излучений; последние методы можно рассматривать как спектрометрические, отличающиеся между собой используемым участком спектра электромагнитных колебаний. К этой же группе методов можно отнести и измерения, использующие теплофизические свойства влажных газов, например их теплопроводность.

Приведенный перечень не исчерпывает всех известных способов определения влажности газов; более подробные обзоры и оценка этих способов даны в литературе [Л. 0-4, 0-5 и 0-9].

Ввиду отсутствия единой общепризнанной классификации методов измерения влажности газов ее можно построить, исходя из различных принципов. В [Л. 0-5] принято деление этих методов на интегральные, промежуточные (равновесные) и мгновенные.

Если обратиться к классификации методов измерения влажности твердых материалов и жидкостей (§ 1-3), интегральные методы соответствуют прямым, равновесные — массообменным, а мгновенные — многопараметрическим (согласно [Л. 1-11]). Однако такое деление методов характеризует главным образом их быстродействие. Правильнее рассматривать в качестве основы классификации физические процессы и свойства водяного пара, используемые для измерения (испарение, конденсация, адсорбция и абсорбция и т. д.), как это сделано в [Л. 6-4]. При этом, однако, получается большое число групп методов, а каждая из них объединяет методы, весьма разнородные по своей физической реализации.

По нашему мнению, более рационально использовать в качестве классификационного признака не только физический процесс, на котором основан тот или иной метод измерения, но и характер физической величины, в которую преобразуется влажность (естественной выходной величины первичного преобразователя). Такой принцип классификации, примененный нами и в отношении твердых тел и жидкостей (см. § 1-3), удобен с точки зрения унификации технических средств измерения.

Все методы измерения влажности газов можно разделить на прямые и косвенные.

Прямые методы основаны на непосредственном разделении влаги и сухого газа с последующим определением количества влаги. В эту категорию входят методы полного поглощения (гравиметрический и химические), конденсационно-сгустительный, с вымораживанием влаги и т. п.

В косвенных методах измеряется та или иная физическая величина, функционально связанная с влагосодержанием газа. Классификация физических методов, рассматриваемых в настоящей книге, показана на рис. 6-1.

К температурным методам, в которых влажность газа преобразуется в температуру, отнесены методы: психрометрический, точки росы и основанный на применении электролитических подогревных датчиков. Большую группу методов, основанных на явлениях сорбции водяного пара твердыми и жидкими телами, можно разделить по характеру величины, в которую преобразуется влажность, на две подгруппы. В первую подгруппу методов, где выходная величина первичного преобразователя является неэлектрической, входят деформационный, цветовой и сорбционно-термический, причем последний метод измерения можно отнести и к температурным. Методы, основанные на использовании электрических гигрометрических датчиков (адсорбционных и абсорбционных, электролитических, кулонометрических), образуют вторую подгруппу сорбционных методов, особенностью которой является электрическая естественная выходная величина первичного преобразователя. Следующая группа основана на измерении различных физических свойств исследуемого газа — неэлектрических (теплопроводности, акустических характеристик и т. п.) или электрических. Условно выделены в самостоятельную группу («спектроскопическую») те методы, в которых используются количественные оценки физических свойств влажного газа в различных участках спектра электромагнитных колебаний — инфракрасном, ультрафиолетовом или сверхвысоких радиочастот; сюда включены и радиометрические методы.

Некоторыми особенностями отличаются измерения очень малых и микроконцентраций влаги в газах — в диапазоне от 10^{-6} до 10^{-4}

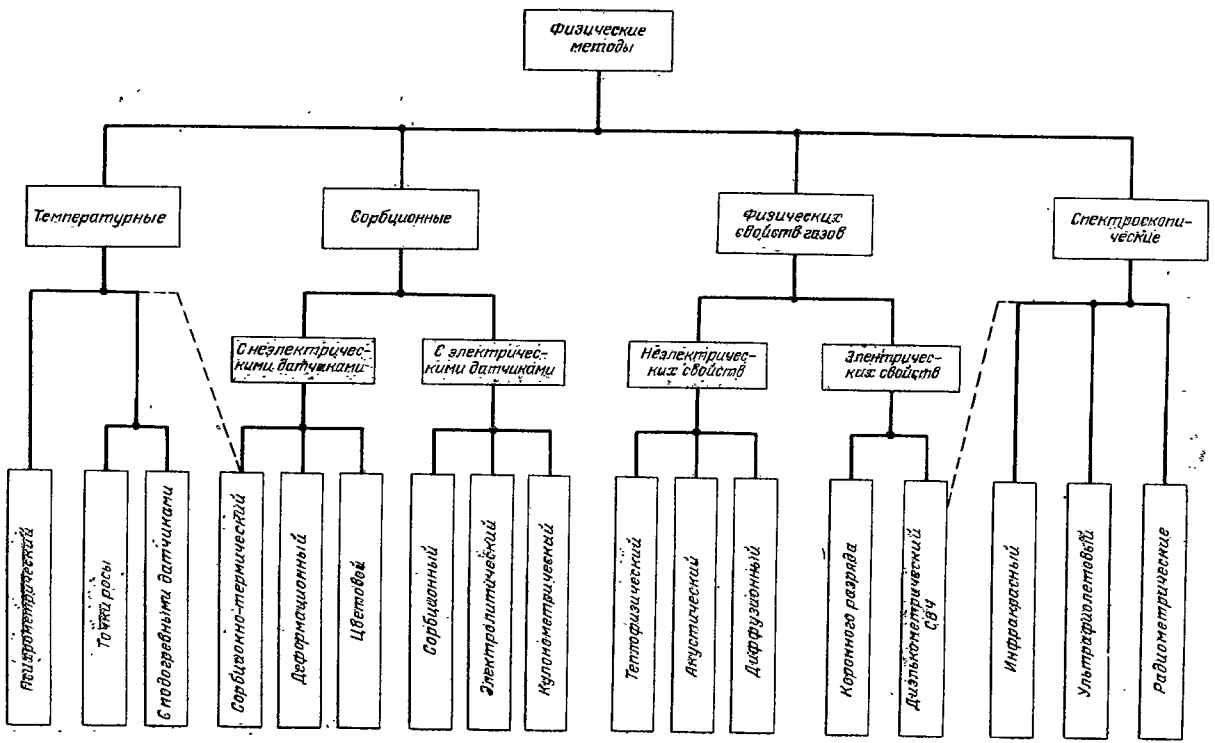


Рис. 6-1. Схема классификации физических методов измерения влажности газов.

(от 1 до 100 м. д.), представляющие собой количественное определение следов влаги.

Указанную задачу решают с помощью лабораторных аналитических методов, например, титрованием реактивом Фишера. Применялись также современные аналитические методы; примером может служить сочетание хроматографического метода с гидридкальциевым. Для контроля и управления производственными процессами в рассматриваемом диапазоне влагосодержаний были разработаны и нашли применение гигрометры следующих типов: точки росы, с электрическими сорбционными датчиками (в частности, алюминиевооксидными и пьезокварцевыми), сорбционно-термические и кулонометрические. При этом возникают определенные затруднения; общий характер имеют, например, погрешности, обусловленные диффузионным проникновением атмосферной влаги в анализируемый газ через стенки газоподводящих коммуникаций, уплотнения и другие детали аппаратуры. Причиной является очень большая разница парциальных давлений водяного пара в окружающем воздухе и анализируемом газовом потоке. Сильно усложняются также градуировка и поверка гигрометров. Способы преодоления этих затруднений и специфические погрешности гигрометров различных типов для микровлагосодержаний рассматриваются ниже, в параграфах, посвященных этим гигрометрам и методам их градуировки.

Глава седьмая

ГИГРОМЕТРЫ, ОСНОВАННЫЕ НА ТЕМПЕРАТУРНЫХ МЕТОДАХ

7-1. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПСИХРОМЕТРЫ

Психрометрический метод является одним из старейших и распространенных в промышленности, метеорологии и научных исследованиях методов измерения влажности воздуха при положительных температурах. Он основан на зависимости между влажностью воздуха и разностью показаний сухого $t_с$ и мокрого $t_м$ термометров, называемой «психрометрической разностью» $t_с - t_м$. Различные теории работы психрометров, разработанные многими исследователями, сводятся к следующим:

а) Теория конвекции, исходящая из предположения насыщения водяным паром воздуха, соприкасающегося с мокрым термометром и являющегося источником всего тепла, нужного для испарения влаги. Необходимо, чтобы скорость вентиляции была бесконечно большой; при несоблюдении этого условия требуется вводить поправку на скорость v движения воздуха.

б) Теория диффузии, основанная на рассмотрении процесса диффузии водяного пара в неподвижном воз-

духе без учета конвективного теплообмена испаряющей поверхности с окружающей средой.

в) Современная теория тепло- и массопереноса (теория подобия), основанная на подобии процессов тепло- и влагообмена. Данная теория учитывает процессы конвекции и диффузии и является наиболее общей. Обе предыдущие теории можно рассматривать как предельные случаи ее применения для $v \longrightarrow \infty$ и $v = 0$.

До сих пор нет универсальной теории психрометра, достаточно полно учитывающей все влияющие факторы. Практически основой психрометрических измерений служат полуэмпирические психрометрические формулы, общепринятой формой которых является:

$$e = E_м - Ap(t_с - t_м), \qquad (7\text{-}1)$$

где e — упругость водяного пара в исследуемой газовой среде; $E_м$ — максимально возможная упругость водяного пара при температуре $t_м$; p — атмосферное давление; A — психрометрический коэффициент [1].

По формуле (7-1) легко определить относительную влажность

$$\varphi = \frac{E_м}{E} - \frac{Ap}{E}(t_с - t_м). \qquad (7\text{-}2)$$

где E — максимальная упругость пара при температуре газа $t_с$.

По показаниям сухого и мокрого термометров можно непосредственно определить относительную влажность φ, если известно значение коэффициента A. Для этой цели используют так называемые психрометрические таблицы или графики, номограммы, специальные счетные линейки и т. п. Все указанные расчетные средства составлены для определенных типов психрометров и условий измерения; в ряде случаев они позволяют по измеренным значениям психрометрической разности и температуры воздуха определить не только относительную влажность, но и другие величины, характеризующие влажность воздуха.

Причиной отсутствия единых (универсальных) психрометрических таблиц является зависимость психрометрического коэффициента A от многочисленных, рассматриваемых ниже факторов. В общем случае психромет-

[1] Величину A иногда называют психрометрической постоянной.

рический коэффициент определяется уравнением

$$A=\frac{c_p}{\gamma L}\left(\frac{a_0}{D}\right)^n, \qquad (7\text{-}3)$$

где c_p — удельная теплоемкость воздуха при постоянном давлении; L — скрытая теплота парообразования; $\gamma=0{,}622$ (см. § 6-1); D — коэффициент диффузии паров воды через воздух; a_0 — коэффициент температуропроводности при 0 °С, $a_0=\lambda/c_p\rho$ (λ — коэффициент теплопроводности, ρ — плотность воздуха).

Величина показателя n зависит от скорости вентиляции психрометра:

$$n=v_г/v,$$

где v — скорость потока воздуха, омывающего смоченный термометр; $v_г$ — скорость воздуха у границы пленки воды. При наличии вентиляции (условия теории конвекции) $n=0$; для неподвижного воздуха (теория диффузии) $v=0$ и $n=1$, а для условий, рассматриваемых теорией подобия, $0<n<1$. Величина n зависит от конструкции психрометра и условий измерения. Так, например, для аспирационного психрометра $n=1/3\div1/2$. Для психрометров с принудительной вентиляцией средняя величина A близка в нормальных условиях к $(620\div625)\times\times10^{-6}$ $1/град$.

Для аспирационного психрометра Шпрунг получил значение $A=0{,}000662$, а для пращевого по Феррелю $A=0{,}000660$ [Л. 0-9]. Указанные значения A фигурируют в часто применяемых психрометрических формулах:

а) Шпрунга (для $p=755$ *мм рт. ст.*)

$$\varphi=\frac{E_м-0{,}5\,(t_с-t_м)}{E};$$

б) Ферреля, учитывающей влияние $t_м$ на скрытую теплоту парообразования:

$$e=E_м-0{,}000660p\,(t_с-t_м)\,(1+0{,}00115t_м).$$

Отметим, наконец, что для других газов значения коэффициента A отличаются от приведенных величин для воздуха; например, в условиях, когда для воздуха $Ap=0{,}5$, было получено [Л. 0-9]:

Газ	O_2	N_2	H_2	CO_2	CH_4	C_2H_6
Ap, *мм рт. ст/град*	0,482	0,481	0,474	0,617	0,587	0,865

Рассмотренные формулы относятся к процессу испарения жидкой воды, т. е. к психрометрам с чувствитель-

ным элементом, покрытым пленкой воды. Для чувствительного элемента, покрытого льдом, в психрометрическую формулу следовало бы подставить $E_л$ — упругость насыщенного пара по отношению ко льду и психрометрический коэффициент $A_л \neq A$. Неравенство значений $A_л$ и A имеет место, в частности, из-за неравенства удельной теплоемкости и скрытой теплоты испарения воды в жидкой и твердой фазах; экспериментальные данные подтверждают наличие такого неравенства. Психрометрический коэффициент зависит от многочисленных факторов, влияющих на тепло- и массообмен чувствительного элемента увлажненного термометра с окружающей средой, — от размера и формы чувствительного элемента, вида и состояния смачиваемого фитиля, теплопроводности защитной оболочки мокрого термометра и ее защиты от теплового излучения; некоторые из перечисленных факторов взаимосвязаны.

Среди внешних условий наибольшее значение имеет скорость воздуха. С ростом скорости воздушного потока усиливается испарение и уменьшается искажающее влияние притоков тепла (радиационного и от теплопроводности) в тепловом балансе мокрого термометра. Коэффициент A быстро убывает с ростом скорости воздушного потока и приближается при $v > 2{,}5$ *м/сек* к постоянной величине. В связи с этим в датчиках большинства современных электрических психрометров предусмотрены устройства для аспирации воздуха с постоянной скоростью в пределах 3—4 *м/сек*. Известен также психрометр, в котором увлажненная термопара непрерывно вибрирует в воздушном зазоре электромагнита переменного тока.

Применение психрометров без принудительной вентиляции, сохранившееся в лабораторной практике и в метеорологических измерениях, приводит к значительным погрешностям, особенно при использовании психрометрических таблиц, составленных для определенной скорости воздуха. В этом случае следовало бы в результат измерения вводить поправку на реальную скорость воздуха, омывающего мокрый термометр. Указанная погрешность может быть весьма значительной при измерении низкой относительной влажности.

Погрешности, связанные со скоростью воздушного потока, зависят и от формы и размеров (диаметр, длина) термочувствительного элемента. Они уменьшаются у датчиков с миниатюрными чувствительными элементами

(спаи термопар, изготовленных из тонких проводников, полупроводниковые микротермисторы и т. п.), так как в этом случае необходимая скорость вентиляции существенно понижается.

Увлажняющий фитиль изготовляется из тонкой хлопчатобумажной ткани (муслин, марля, батист, предварительно прокипяченные для удаления шлихты и апретуры); для хорошего термического контакта с термочувствительным элементом фитиль должен плотно прилегать к нему. Загрязнение фитиля пылью и другими твердыми частицами вызывает дополнительную погрешность (вследствие уменьшения величины $E_м$). Особенно опасно не обнаруживаемое визуально загрязнение фитиля водорастворимыми солями (например, содержащимися в морском воздухе или в воде, используемой для увлажнения). Мерами борьбы с загрязнением фитиля являются использование для его увлажнения дистиллированной воды, частая смена и кипячение фитиля.

Влияние радиации сводится к прямому воздействию солнечных лучей и переносу тепла к термометрам от окружающих тел, имеющих более высокую температуру, а также к потерям тепла на излучение сухим термометром при понижении температуры окружающей среды. Предложенные ранее расчетные поправки или способы автоматической компенсации влияния радиации усложняют устройство психрометра и технику измерения и недостаточно точны. Обычно в психрометрах ограничиваются применением известных средств защиты от влияния теплового излучения, например защитных экранов.

Дополнительные затруднения возникают, если измерения выполняются при отрицательных или высоких положительных температурах воздуха. Психрометрический метод применим и при отрицательных температурах, однако не очень низких. При низких температурах относительная погрешность измерения психрометрической разности увеличивается, так как величина этой разности сильно уменьшается с понижением температуры. Для предотвращения обледенения чувствительного элемента предлагалось применять для увлажнения 3%-ный водный раствор формальдегида. По некоторым данным это влечет за собой изменение психрометрического коэффициента; от указанного недостатка свободен раствор аммиака в воде (в отношении 1 : 2). Другой

способ заключается в повышении температуры воздуха, поступающего в психрометр.

Верхний предел температур также ограничен. Принято считать, что психрометры можно применять (при атмосферном давлении) в пределах до +100 °С. Однако для ряда производственных процессов представляет интерес измерение при более высоких температурах. Экспериментально была доказана возможность измерений с помощью психрометров при температурах до +160° и даже +200 °С [Л. 7-1]. С повышением температуры увеличивается влияние радиационного притока тепла на температуру мокрого термометра. Кроме того, точка кипения воды определяет верхний предел температуры мокрого термометра. Давление насыщенного водяного пара при температуре выше +100 °С превышает атмосферное давление и состояние насыщения не может быть достигнуто без повышения давления газа; следовательно, при нормальном атмосферном давлении максимальное значение измеряемой относительной влажности φ будет около 26% при $t=140$ °С и $\sim 10\%$ при $t=180$ °С.

Были разработаны специальные психрометрические таблицы для температур выше 100 °С, например [Л. 7-2] для диапазона от 0 до 150 °С при давлении 1013,12 *мбар*.

Для того чтобы обойти затруднения, возникающие при температуре выше 100 °С, датчик психрометра располагают вне высокотемпературной среды и подают в него контролируемый газ, предварительно охлажденный до температуры ниже точки кипения воды, но превышающей температуру точки росы (во избежание конденсации влаги). Если же сухой и мокрый термометры находятся при температуре выше 100 °С, основной задачей является сохранение мокрого чувствительного элемента в состоянии влагонасыщения. Для этого применяется непрерывное водоснабжение дистиллированной водой; применение водопроводной воды ограничено образованием корки на фитиле и необходимостью его частой смены.

Задача облегчается заменой матерчатого фитиля пористым керамическим элементом или другими «бесфитильными» способами увлажнения, рассмотренными ниже. Скорость протекания газа обычно устанавливают более высокой, чем при более низких температурах.

Малоблагоприятными являются также области очень низкой и очень высокой относительной влажности. В первом случае положительные результаты дает принуди-

тельное увлажнение мокрого термометра и предварительное охлаждение воды, увлажняющей фитиль. При относительной влажности, близкой к 100%, необходимы высокие чувствительность и точность измерения психрометрической разности, так как ее величина стремится к нулю.

Суммарная статическая погрешность измерения психрометром относительной влажности имеет две составляющие. Первая обусловлена рассмотренными факторами, влияющими на величину психрометрического коэффициента A. При этом ошибки, связанные с некорректностью принятого коэффициента A, входят в неустранимую «градуировочную» погрешность психрометра, а изменения влияющих величин по отношению к условиям градуировки вызывают дополнительные погрешности измерения.

Вторая группа погрешностей в соответствии с формулой (7-2) состоит из погрешностей измерения давления p, температур $t_с$ и $t_м$ и определения значений максимальных упругостей водяного пара E и $E_м$. Главной

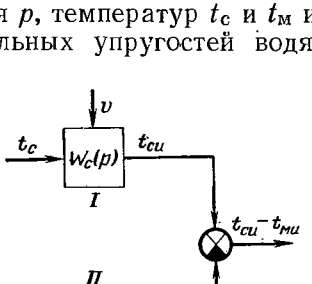


Рис. 7-1. Структурная схема психрометрического датчика. $t_{сu}$, $t_{мu}$ — выходные величины сухого и смоченного термометров.

является погрешность измерения психрометрической разности, зависящая не только от абсолютных значений погрешностей измерения $\Delta t_с$ и $\Delta t_м$, но и от их знака. Наибольшая погрешность возникает при разных знаках $\Delta t_с$ и $\Delta t_м$. Для минимизации этой погрешности сухой и мокрый термометры должны иметь одинаковую статическую характеристику.

Значительно сложнее *динамические характеристики* психрометра. Сухой термометр (I на рис. 7-1) можно с практически достаточной точностью аппроксимировать апериодическим (инерционным) звеном перво-

го порядка с передаточной функцией

$$W_c(p) = \frac{k}{T_c p + 1},$$

где T_c — постоянная времени сухого термометра; k — его статический коэффициент передачи; p — оператор дифференцирования.

T_c может быть выражена в функции основных параметров чувствительного элемента термометра:

$$T_c = cm/\alpha S,$$

где c — теплоемкость; m — масса; S — площадь поверхности; α — коэффициент теплопереноса.

Влияние наиболее существенных внешних воздействий — скорости v и давления p газа — по [Л. 0-9] выражается приближенной зависимостью

$$T_c = B(vp)^{1/2},$$

где B — постоянная.

Известные аналитические описания динамических свойств смоченного термометра не выражают в явной форме влияния ряда внешних возмущающих воздействий на эти свойства, а также их непостоянства, в частности, вследствие зависимости от измеряемой величины. Экспериментальные исследования выявили влияние указанных факторов. Так, например, было установлено существенное значение толщины фитиля и его загрязнений гигроскопическими солями для инерционности мокрого термометра. Постоянная времени $T_м$ является переменным параметром, зависящим от влагосодержания и температуры исследуемого газа. Точная модель должна, следовательно, представлять мокрый термометр как систему с распределенными параметрами, описываемую уравнением в частных производных. Практически удобнее пользоваться экспериментальными динамическими характеристиками и приближенно считать инерционность канала *II* (рис. 7-1) постоянной для определенного диапазона изменений влияющих величин. Для малых отклонений от состояния равновесия это приводит к простой линейной модели мокрого термометра.

На основании экспериментального исследования аспирационных психрометров в [Л. 7-3] мокрый термометр аппроксимируется линейным апериодическим зве-

ном 2-го порядка с передаточной функцией

$$W_{м}(p)=\frac{k}{(T_{м1}p+1)(T_{м2}p+1)},$$

причем между постоянными времени имеется соотношение $T_{м1}\approx 10\,T_{м2}$. Зависимость значений $T_{м1}$ и $T_{м2}$ от скорости воздуха v и температуры $t_{м}$ показана на рис. 7-2, из которого видно, что повышение скорости v существенно уменьшает инерционность психрометра.

Изменение температуры $t_{с}$ в пределах 25—50 °С мало влияет на значение обеих постоянных времени.

Рассмотренная структурная схема приводит к выводу о возможности дополнительных динамических по-

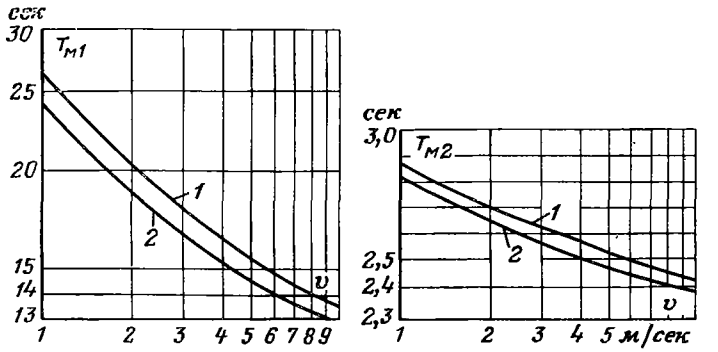


Рис. 7-2. Зависимость постоянных времени $T_{м1}$ и $T_{м2}$ смоченного термометра от скорости воздуха v при разных температурах смоченного термометра.

1 — 17,5 °С; *2* — 22,5 °С.

грешностей, обусловленных неодинаковыми динамическими свойствами обоих каналов измерения. Разница постоянных времени сухого и мокрого термометров может быть весьма значительной. Для устранения указанной погрешности можно использовать известные методы автоматической коррекции; ее можно одновременно использовать для повышения быстродействия обоих каналов. Более простой способ заключается в увеличении величины $T_{м}$ (для достижения равенства $T_{м}=T_{с}$) нанесением на чувствительный элемент мокрого термометра (под фитилем) теплоизолирующего слоя в виде пленки гидрофобного материала (например, эпоксидной смолы) или тонкостенной теплоизолирующей гильзы. При этом,

однако, исключается возможность повышения быстродействия психрометра.

В датчиках электрических психрометров используются термопары, термометры сопротивления и полупроводниковые термисторы и термодиоды.

Простейший термоэлектрический датчик представляет собой термопару, один из спаев которой выполняет функцию сухого термометра, а второй снабжен увлажняющим фитилем. Прибор, измеряющий термо-э. д. с., непосредственно показывает психрометрическую разность. Для измерения при низких температурах или в тех случаях, когда необходима повышенная чувствительность датчика, применяется батарея из нескольких или нескольких десятков термопар, изготовленных из тонких проволочек. Спаи термобатареи разделены на две группы. Одна из них смачивается фитилем, вторая выполняет роль чувствительного элемента сухого термометра; термо-э. д. с., пропорциональная психрометрической разности, измеряется на выводах термобатареи. Психрометры с термоэлектрическими датчиками применяют преимущественно в тех случаях, когда температура воздуха изменяется в очень узких пределах и для определения величины относительной влажности достаточно знания психрометрической разности. В этих условиях простота измерительной схемы термоэлектрического психрометра является несомненным преимуществом. Кроме того, благодаря малым размерам и малой теплоемкости мокрого спая термопарный датчик отличается высоким быстродействием и требует меньшей скорости вентиляции, чем датчики с промышленными термометрами.

Благодаря этим достоинствам термопарные психрометры нашли применение в качестве лабораторных приборов для измерений в диапазоне 95—100% относительной влажности, для исследований системы почва — растение — воздух и других биологических и почвенных систем.

При этом наметились две модификации конструкций психрометрического датчика. Первая основана на предельной миниатюризации термопары и применении специальных способов увлажнения ее слоя. В датчике, предложенном Ричардсом и Огата, спай микротермопары, имеющий форму петли, смачивает капля воды, удерживаемая этой петлей. Другое решение заключается

в охлаждении одного из спаев термопары пропусканием постоянного тока (эффект Пельтье), что влечет за собой конденсацию влаги в виде тонкой пленки на поверхности спая, используемого в качестве мокрого термометра [Л. 7-4]. Измерения выполняются в пробирке, капсуле или другом малом замкнутом объеме неподвижного газа; оптимальные значения силы тока и длительности его пропускания определяют экспериментом.

В электрических психрометрах часто применяют полупроводниковые термисторы благодаря их известным достоинствам. Термисторные психрометры нашли достаточно широкое применение в микроклиматологических измерениях на различных высотах, в агрометеорологии и агрофизике.

Конструкция датчика переносного психрометра с двумя термисторами и устройством для вентиляции описана в [Л. 7-5].

В последние годы был разработан психрометр, имеющий в качестве сухого и мокрого термометров кремниевые полупроводниковые диоды, работающие при постоянной силе тока [Л. 7-6]. В этом режиме прямое напряжение диодов является линейной функцией их температуры в пределах от —273 до +100 °С, а угол наклона вольттемпературной характеристики одинаков для диодов одного типа.

В электрических психрометрах промышленного типа чаще всего используются типовые проволочные термометры сопротивления. Одна из первых конструкций датчика показана на рис. 7-3. Контролируемый воздух, засасываемый в нижнее отверстие, находящееся в металлическом корпусе *1*, омывает два спаренных сухих термометра *2* (один из них служит для измерения психрометрической разности, второй — температуры) и мокрый термометр *3*. Последний увлажняется хлопчатобумажным фитилем, всасывающим воду из сосуда *4*, куда она поступает через штуцер *5* из внешнего бачка. Термометры сопротивления помещены в трубку *6*. Движение воздуха создает вентилятор *7*.

Датчики других конструкций не имеют встроенного вентилятора, так как надобность в нем отпадает, если поток газа может создаваться за счет перепада давлений или если газ находится в непрерывном движении. Если скорость движения воздуха недостаточна, к датчику дополнительно прилагается вытяжное устройство. В дат-

чиках с принудительной циркуляцией воздуха сухой термометр всегда располагается в потоке газа перед мокрым.

У психрометров непрерывного действия особое внимание приходится уделять водоснабжению мокрого термометра, так как высыхание фитиля влечет за собой большую погрешность измерения. Для длительной работы без обслуживания предусматривается внешний бачок достаточно большого объема. Обычно вода поступает в датчик самотеком по принципу сифона; при этом необходима герметичность внешнего бачка, а приток воды

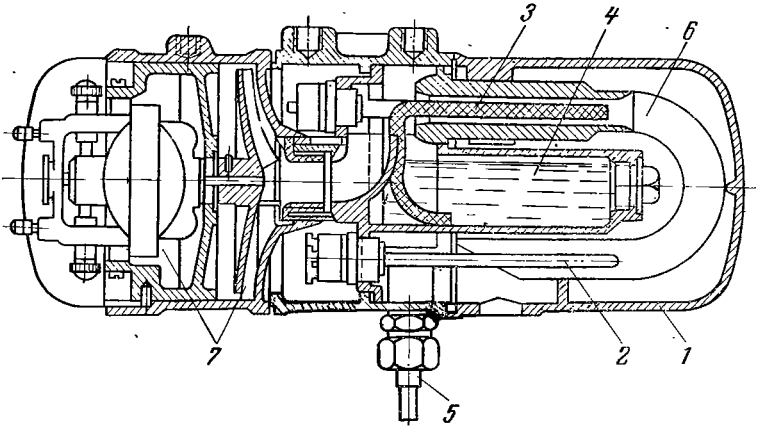


Рис. 7-3. Датчик психрометра с термометрами сопротивления.

зависит от атмосферного давления. Эти недостатки устраняются применением в бачке датчика поплавкового регулятора, что, однако, усложняет его конструкцию. Иногда применяют «двойное» питание водой с помощью двух фитилей, к которым вода поступает из верхнего и нижнего бачков.

При измерениях влажности промышленных газов, обычно запыленных и имеющих повышенную температуру, наиболее серьезным затруднением является загрязнение фитиля.

Применение фильтров представляет собой лишь полумеру. Более радикальной мерой защиты от запыленности газа является отказ от применения смачивающего

фитиля, имеющего и другой недостаток — неприменимость при температурах выше 100 °С. Такое решение было применено в датчике психрометра для измерения влажности дутья, подаваемого в доменную печь. В этом датчике мокрый термометр смачивается распыленной водой, которую эжектирует из сосуда воздух, поступающий в распылительное устройство. Вторая особенность датчика заключается в автоматическом регулировании давления и температуры воздуха, поступающего на увлажненный термометр. Регулирование давления необходимо для правильной работы эжектирующего устройства.

В другой конструкции «бесфитильного» датчика мокрый термометр сопротивления заключен в гильзу из молибденового стекла, нижняя часть которой покрыта пористым стеклом толщиной 0,3 *мм*. Пористое стекло служит для смачивания гильзы водой, подаваемой из бачка через капиллярную трубку. Термометр, увлажняемый пористым стеклом, может работать в потоках агрессивных газов, например хлора. Однако гильзы из пористого стекла или керамики обладают малой механической прочностью и увеличивают инерционность мокрого термометра.

Измерительные схемы электрических психрометров определяются: а) видом измеряемой величины, выбранной в качестве характеристики влажности; б) типом примененного датчика.

Наиболее просто осуществляется раздельное измерение температур мокрого и сухого термометров с последующим определением влажности (абсолютной или относительной) по психрометрическим таблицам, графикам, номограммам и т. п. Такой широко применяемый на практике метод, разумеется, не позволяет автоматизировать измерение влажности.

В ряде случаев, если температура воздуха постоянна или изменяется в узких пределах, относительную влажность можно оценить с точностью, достаточной для практических целей, по психрометрической разности, измерение которой можно автоматизировать. Автор применял для этой цели схему с автоматическим уравновешенным мостом (рис. 7-4) [Л. 7-7]. Ее особенностью является введение в плечо, содержащее мокрый термометр $R_м$, постоянного резистора r, равного по величине сопротивлению реохорда. Равновесие моста имеет место при усло-

вии

$$(R_c + r - x)R = (R_м + r + x)R,$$

откуда $x = (R_c - R_м)/2$, где R_c, $R_м$ — сопротивления сухого и мокрого термометров; R — сопротивление постоянных плеч моста; x — сопротивление между началом реохорда (точка O) и его движком.

Психрометрической разности, равной нулю, соответствует положение движка в точке O. Сопротивление реохорда должно равняться половине максимальной разности сопротивлений сухого и мокрого термометров.

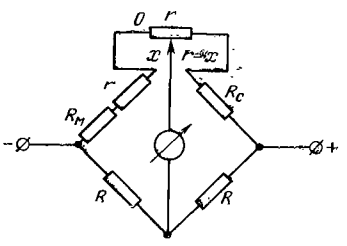


Рис. 7-4. Схема измерения психрометрической разности автоматическим мостом.

Электрические психрометры позволяют также измерять абсолютную влажность, упругость водяного пара или температуру точки росы. На основании психрометрической формулы измерение упругости водяного пара сводится к измерению разности двух токов, первый из которых является линейной функцией t_c, а второй — функцией $t_м$ [Л. 7-5].

Другой психрометрический прибор для измерения упругости водяного пара e с помощью проволочных термометров сопротивления [Л. 0-9] основан на приближенном соотношении

$$e = F(t_м) - At_c p + Bt_м p,$$

где $F(t_м)$ — нелинейная функция температуры $t_м$ мокрого термометра; A — психрометрический коэффициент; p — атмосферное давление; B — постоянная.

Вторая и третья составляющие этого выражения моделируются выходными напряжениями мостов постоянного тока, содержащих соответственно сухой и мокрый термометры; для воспроизведения $F(t_м)$ используется мост со вторым смоченным термометром сопротивления.

Наибольший интерес представляют схемы, позволяющие измерять непосредственно относительную влажность в сравнительно широком диапазоне температуры и влажности. В СССР и за рубежом выпускаются психрометры с проволочными термометрами сопротивления и терми-

сторами со шкалой, градуированной в процентах относительной влажности. В них используются упрощенные измерительные схемы, решающие уравнения, полученные путем аппроксимирования зависимостей, связывающих относительную влажность с t_c и $t_м$ или с t_c и $t_c—t_м$.

На рис. 7-5,*а* показано семейство кривых $t_c—t_м = f(t_c)$ с параметром φ. Считая, что эти кривые пересекают ось абсцисс в одной точке (расположенной на оси

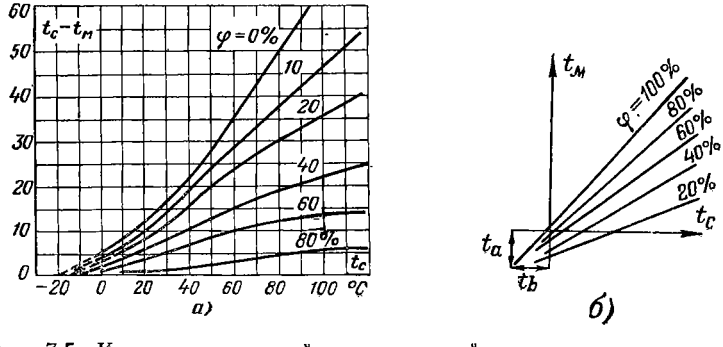


Рис. 7-5. Кривые постоянной относительной влажности в координатах.

а — температура — психрометрическая разность; *б* — температура сухого термометра — температура мокрого термометра.

абсцисс между —7 и —20 °С), с некоторым приближением можно описать их уравнением

$$100 - \varphi = k_1 \frac{t_c - t_м}{k_2 + t_c - k_3 t_c^2}, \qquad (7\text{-}4)$$

где k_1, k_2, k_3 — постоянные величины.

Для решения уравнения (7-4) применен магнитоэлектрический логометр, измерительная рамка которого включается в мост, содержащий в двух смежных плечах сухой и мокрый термометры сопротивления, а вторая (противодействующая) рамка — во второй мост, одним из плеч которого является сухой термометр. Оба моста питает общий источник постоянного тока. Параметры обоих неравновесных мостов подобраны так, что ток в диагонали первого моста пропорционален психрометрической разности, а ток в диагонали второго — выражению $(k_2 + t_c — k_3 t^2_c)$. Отклонение стрелки прибора пропорционально отношению токов в обеих рамках, и шкала логометра

в соответствии с выражением (7-4) градуируется в процентах относительной влажности.

В современных автоматических психрометрах применяются преимущественно измерительные схемы, содержащие два термометрических датчика в сочетании с автоматическими регистрирующими приборами (электронные мосты и потенциометры).

Широко применяемая измерительная схема основана на использовании семейства кривых $\varphi=\text{const}$ в координатах t_c, $t_м$.

Эти кривые можно аппроксимировать прямыми (рис. 7-5,*б*) и с известным приближением считать, что они пересекаются в одной точке с координатами t_a, t_b, образуя веерообразный пучок. Следовательно, относительную влажность φ можно выразить как функцию отношения

$$\varphi = f\left(\frac{t_м - t_a}{t_c - t_b}\right). \qquad (7\text{-}5)$$

Для узкого диапазона температур, например $0 \leqslant t_c \leqslant +40$ °С, можно принять $t_a = t_b = -14$ или -15 °С.

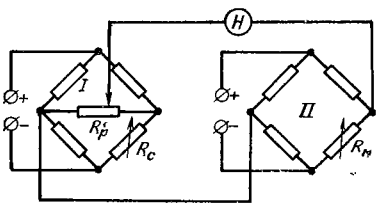


Рис. 7-6. Измерительная схема психрометра с термометрами сопротивления и шкалой в единицах относительной влажности.

Измерительная схема психрометра (рис. 7-6) состоит из двух мостов, имеющих одну общую точку и самостоятельные источники питания. Мост *I* содержит в качестве плеча сухой термометр сопротивления R_c, мост *II* — мокрый термометр $R_м$. В диагональ моста *I* включен реохорд $R_р$, а на вход указателя нуля *H* подается разность выходного напряжения $U_м$ моста *II* и напряжения $U_р$ между началом реохорда и его движком. При соответствующем подборе постоянных сопротивлений, входящих в остальные плечи мостов *I* и *II*, можно написать:

$$U_м = k_1(t_м - t_a);$$
$$U_р = k_2(t_c - t_b),$$

где k_1, k_2 — коэффициенты пропорциональности.

Если реохорд намотан равномерно, то при равновесии

$$U_м = xU_р$$

(x — перемещение движка реохорда) или

$$x = \frac{k_1}{k_2}\frac{t_м - t_a}{t_a - t_b}.$$

Таким образом, шкалу реохорда можно градуировать в процентах относительной влажности.

В реальной схеме автоматического психрометра (например, прибора ПЭ [Л. 0-1]) оба моста имеют общий источник питания, общими являются также два плеча с постоянными сопротивлениями.

Известные схемы психрометров для непосредственного измерения относительной влажности с использованием полупроводниковых термисторов представляют собой мосты, имеющие в качестве смежных плеч сухой и мокрый термисторы и дополненные схемой с третьим термистором, измеряющим температуру воздуха.

В [Л. 7-5] зависимость относительной влажности φ от психрометрической разности Δt аппроксимируется уравнением

$$1 - \varphi = a_1\Delta t - a_2(\Delta t)^2 + a_3(\Delta t)^3,$$

где a_1, a_2, a_3 — коэффициенты, изменяющиеся в функции температур сухого и мокрого термометров.

Предложенная измерительная схема психрометра (рис. 7-7,*а*) представляет собой неуравновешенный мост с сухим $R_с$ и мокрым $R_м$ термисторами, у которого диагональ питания содержит последовательно с источником питания большое постоянное сопротивление r; кроме того, эта диагональ шунтирована дополнительным термистором $R_{с.д}$, измеряющим температуру воздуха. Отсчет относительной влажности производится по шкале показывающего прибора H.

Схема, приведенная на рис. 7-7,*б* [Л. 7-8], основана на уравнении (7-5). Используется также то обстоятельство, что выходное напряжение омического делителя напряжения, состоящего из термистора $R_т$ и последовательного постоянного резистора R,

$$U_{вых} = \frac{R}{(R_т + R)}U_{вх}$$

($U_{вх}$ — напряжение, приложенное к делителю) приблизительно пропорционально температуре, измеряемой термистором. Такие два делителя, содержащие термисторы — сухой $R_с$ и мокрый $R_м$, включены во входную и выходную цепи типового операционного (инвертирующего) усилителя $У$.

Напряжение, снимаемое с выходного делителя усилителя,

$$U_2 \approx U_1 \frac{t_м - t_a}{t_с - t_b},$$

где U_1 — напряжение, подаваемое на входной делитель; остальные обозначения — см. формулу (7-5).

Напряжение U_2 измеряет показывающий прибор $П$. Как и другие схемы, основанные на аппроксимированных зависимостях, данная схема обеспечивает удовлет-

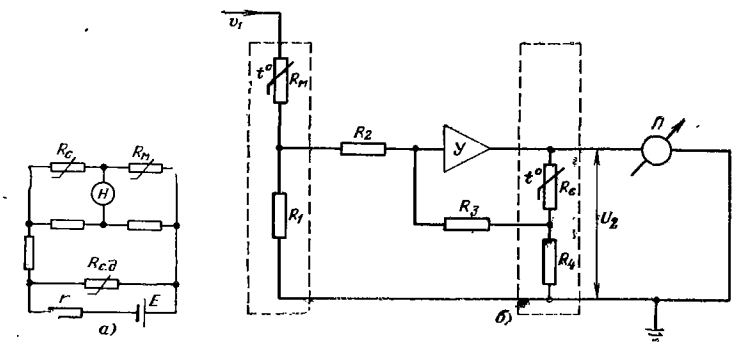


Рис. 7-7. Измерительные схемы психрометров с термисторами.

ворительную точность измерения относительной влажности лишь для относительно узких диапазонов изменений φ ($40 \leqslant \varphi \leqslant 100\%$) и $t_с$ ($15 \leqslant t_с \leqslant 40\,°C$).

Переходя к общей оценке психрометров, можно отметить их достоинства: использование типовых температурных датчиков, удовлетворительную точность измерения при положительных температурах и возможность градуировки по температурам сухого и мокрого термометров, а не по влажности. Недостатками являются необходимость вентиляции мокрого термометра, зависимость показаний от давления газа, невозможность применения при низких отрицательных температурах и затруднения с увлажнением и определением фазового состояния воды при температурах ниже 0 °С. При производственном кон-

троле дополнительные затруднения вызывают необходимость обслуживания (водоснабжение, смена фитиля) и чувствительность психрометра к загрязнениям исследуемого газа. Перечисленные недостатки послужили причиной наблюдаемого в последние годы вытеснения психрометров гигрометрами других типов, описанными в последующих параграфах и главах.

7-2. ГИГРОМЕТРЫ ТОЧКИ РОСЫ

Метод точки росы, применявшийся на протяжении многих лет в качестве точного лабораторного метода определения влажности воздуха, за последние десятилетия стал одним из основных методов автоматического контроля влажности воздуха и других газов. Он находит широкое применение в промышленности, метеорологии, исследованиях атмосферы с помощью летательных аппаратов. При практическом осуществлении метода процесс конденсации наблюдается не на поверхности воды или льда, а на поверхности охлаждаемого твердого тела («конденсационной площадке»), которую в дальнейшем будем называть зеркальцем. Усовершенствование и автоматизация операций охлаждения зеркальца и обнаружения конденсата на его поверхности превратили определение точки росы τ в непрерывный, малоинерционный измерительный процесс.

Достоинства гигрометров точки росы — большие пределы измерений, вплоть до очень низких τ (—100 °С и ниже), в широком диапазоне температур и давлений, охватывающем низкие отрицательные температуры и высокие давления, удовлетворительная точность во всем диапазоне измерений, выходная величина, консервативная по отношению к температуре анализируемого газа, возможность градуировки по температуре, а не по влажности.

Их основными недостатками являются некоторая сложность конструкции (наличие охлаждающего устройства), уменьшение точности измерения с увеличением относительной влажности, зависимость результата измерения от характера и состояния поверхности зеркальца, от ее загрязнения.

Измерение температуры точки росы сводится к выполнению следующих операций: 1) понижению темпера-

туры поверхности зеркальца; 2) фиксации момента возникновения конденсата (в виде росы или льда) на рабочей поверхности зеркальца; 3) измерению температуры этой поверхности.

Степень автоматизации перечисленных операций определяет тип гигрометра. В неавтоматических гигрометрах все операции выполняет человек. Полуавтоматические гигрометры характеризуются тем, что одна или две из перечисленных операций выполняются автоматически. Наконец, в автоматических приборах автоматизированы все операции, связанные с процессом измерения. Первые два типа охватывают приборы дискретного действия, третий — гигрометры, предназначенные для непрерывного измерения и регулирования. Известно большое количество гигрометров точки росы всех указанных типов, отличающихся своими конструктивными особенностями и работой отдельных частей.

Неавтоматические гигрометры точки росы имеют наиболее простую конструкцию и низкую стоимость. Фиксация момента начала конденсации несколько условна. Температура появления заметного налета на поверхности зеркальца и температура, при которой этот налет исчезает, значительно разнятся. В неавтоматических гигрометрах в качестве точки росы принимается средняя арифметическая указанных температур, что создает возможность субъективных ошибок оператора. В простейших неавтоматических гигрометрах для охлаждения зеркальца применялись легко испаряющиеся жидкости (эфир и др.). Скорость испарения уменьшается с понижением температуры, и этот способ неприемлем при низких τ. В полуавтоматических и автоматических гигрометрах нашли применение охлаждающие смеси, чаще всего смеси твердой углекислоты (сухой лед) с бензином или спиртом (температура —78,6 °С при атмосферном давлении). Для более глубокого охлаждения используют сжиженные газы, например азот или жидкий воздух (температура —194 °С).

Полуавтоматические гигрометры позволяют при условии выбора надлежащего охладителя измерять очень низкие температуры точки росы τ. Однако при $\tau <$ $<$ —80 °С сильно возрастает количество газа, необходимое для надежного обнаружения глазом слоя конденсата; соответственно увеличивается длительность одного определения. Многочисленные конструкции неавтомати-

ческих и полуавтоматических гигрометров точки росы описаны в [Л. 0-9] и в пособиях по метеорологическим измерениям.

Наибольший интерес представляют автоматические гигрометры точки росы. Приборы этого типа обладают значительно более высоким быстродействием по сравнению с неавтоматическими приборами и могут работать в автоматических системах. Автоматическое фиксирование точки росы по размерам (толщина, диаметр) слоя конденсата является объективным и позволяет правильно выбрать момент измерения и повысить его точность.

Метрологические и другие технические характеристики автоматического гигрометра точки росы в значительной степени зависят от принятого способа охлаждения зеркальца.

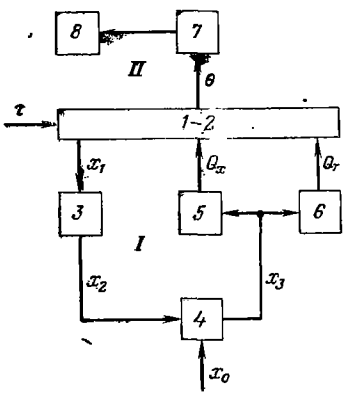


Рис. 7-8. Обобщенная функциональная схема автоматического гигрометра точки росы.

Современные приборы этого типа имеют термоэлектрическое охлаждение, измерительную схему, собранную на статических элементах (магнитных полупроводниковых и т. п.), и отличаются высокой надежностью, малыми габаритами и весом.

Обобщенная функциональная схема автоматического гигрометра точки росы приведена на рис. 7-8. Она состоит из автоматической следящей системы *I* и измерительной системы *II*. Входной величиной следящей системы является температура точки росы τ исследуемого газа, выходной — автоматически регулируемая температура θ зеркальца. Общим объектом для обеих систем является зеркальце *1-2*; они не имеют других связей. Физическая величина x_1, характеризующая появление и параметры конденсата на охлаждаемой поверхности, преобразуется «детектором конденсата» *3* в величину другого вида (обычно электрическую) x_2. На вход регулирующего устройства *4* поступает разность текущего и заданного значений $x_2—x_0$.

Регулирующее воздействие на объект (изменение притока тепла $Q_т$ и холода $Q_х$) осуществляется с помощью двух исполнительных элементов: охлаждающего *5* и нагревающего *6* зеркальце. Регулятор *4* может быть плавного или релейного действия и осуществлять регулирование по одному из известных законов.

Вторая система является разомкнутой и состоит из температурного датчика 7, измеряющего температуру 0 охлаждаемой поверхности зеркальца, и автоматического прибора *8*, измеряющего выходную величину датчика.

Отдельные элементы рассмотренной схемы могут быть выполнены на основе различных физических принципов и в различном конструктивном оформлении.

Зеркальце. К материалу и размерам конденсационной площадки предъявляются требования — отсутствие сорбции влаги и градиентов влажности (по толщине и радиальных), а также минимальная тепловая инерция; последнее обусловлено тем, что температура зеркальца определяется в динамическом состоянии. При оптическом детектировании росы применяют металлические, тщательно полированные зеркальца, изготовленные из серебра, никеля, нержавеющей стали или других устойчивых к коррозии металлов; иногда зеркальце изготовляют из металлов с антикоррозионным покрытием из родия, золота и т. п. Для кондуктометрического детектирования зеркальце изготовляется из твердого диэлектрика (чаще всего стекла) или тонкого слоя диэлектрика на металлической подложке.

Уменьшение массы зеркальца достигается уменьшением его площади и толщины; применялись зеркальца диаметром 1,5—3 *мм,* а для минимизации толщины зеркальце выполнялось напылением слоя металла на охлаждаемую поверхность. Однако площадь зеркала определяет порог чувствительности детектора росы и это ограничивает ее минимальную величину.

Датчики для измерения температуры зеркальца. Для измерения температуры рабочей поверхности зеркальца применяют термопары, проволочные термометры сопротивления и полупроводниковые термисторы. Требованиями, предъявляемыми к датчику любого типа, являются минимальные тепловая инерция и габариты, высокая чувствительность и возможно лучший тепловой контакт с поверхностью зеркальца.

Детектор конденсата. Наиболее распространен оптический метод обнаружения росы с помощью фотоэлементов, в котором используется эффект ослабления светового потока (источником которого обычно служит электрическая лампа накаливания), отраженного и диффузно рассеянного металлической зеркальной поверхностью, вследствие образования слоя конденсата в твердой или жидкой фазе на этой поверхности. Изменение толщины или размеров «пятна» конденсата можно оценить по ослаблению интенсивности света, отраженного на фотодетектор (фотоэлемент, полупроводниковый фоторезистор или фотодиод).

Для уменьшения влияния изменений светового потока, колебаний напряжения и характеристик фотодетектора фотоэлектрическое устройство осуществляют по известным схемам сравнения (дифференциальным, уравновешенным и т. д.) с применением второго, опорного фотодетектора. При этом оптическая система гигрометра построена так, что если на основной детектор попадает свет, непосредственно отраженный от зеркала, то опорный воспринимает или часть светового потока осветителя или поток, рассеянный зеркалом. Расположение рассмотренных элементов в датчике гигрометра показано на рис. 7-9.

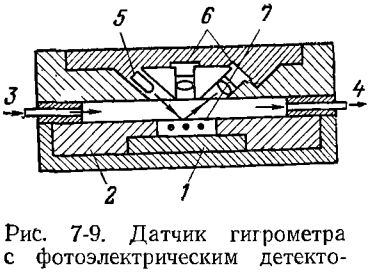


Рис. 7-9. Датчик гигрометра с фотоэлектрическим детектором росы.

1 — термоэлектрический модуль; *2* — теплоизоляция; *3, 4* — вход и выход газа; *5* — осветитель; *6* — фоторезисторы; *7* — зеркальце.

Кондуктометрический способ фиксации точки росы основан на измерении поверхностного сопротивления $R_п$ зеркальца. У стекла, покрытого пленкой конденсата, величина $R_п$ по мере приближения к точке росы уменьшается по закону, близкому к экспоненциальному. Водная пленка образуется на поверхности стекла раньше, чем ее можно обнаружить оптическим способом, и кондуктометрический метод обладает высокой чувствительностью; он не реагирует также на некоторые факторы (размеры, радиусы кривизны и число капель влаги), оказывающие существенное влияние на оптические характеристики слоя конденсата. Выходной сигнал кондуктометрического детектора точки росы в известной

степени характеризует массу (толщину) слоя конденсата между электродами на поверхности зеркальца. Образование конденсата в твердой фазе резко увеличивает сопротивление $R_п$ между электродами. Это свойство можно использовать для определения фазового состояния конденсата, но оно препятствует применению детектора для измерений при отрицательных температурах точки росы.

Основным недостатком кондуктометрического способа является зависимость сопротивления $R_п$ от состояния поверхности между электродами, в первую очередь от загрязнения этой поверхности. Электроды изготовляют преимущественно в виде тонких слоев металла (например, платины), нанесенных на поверхность диэлектрика. Для уменьшения величины $R_п$ зазор между электродами уменьшают до десятых долей миллиметра; это, однако, повышает чувствительность детектора к загрязнениям. Предлагалось покрывать поверхность стекла у края каждого электрода клинообразным слоем проводящего материала (например, графита); благодаря этому расстояние между электродами можно увеличить до 2—10 *мм*. Более радикальной мерой является выполнение конденсационной площадки в виде слоя гигроскопической соли (например, NaCl) [Л. 7-9]. Детектором росы служат два металлических электрода, заложенные в соль вблизи ее поверхности. Конденсация влаги на поверхности соли при ее охлаждении до точки росы вызывает резкое изменение сопротивления между электродами. Чувствительным элементом детектора может служить также стеклоткань, закрепленная на поверхности зеркальца и пропитанная насыщенным раствором хлористого лития.

Родственным кондуктометрическому являются детектор росы на принципе «гальванического элемента», возникающего при замыкании пленкой конденсата двух электродов, изготовленных из различных металлов [Л. 7-10]. У такого детектора отсутствует источник питания током; его выходной величиной является э. д. с. между электродами. О практическом применении этого принципа нет данных.

Радиационные детекторы основаны на поглощении альфа- или бета-излучения слоем росы (льда). В осуществленных детекторах источником альфа-лучей служил изотоп Po^{210}, наносимый на поверхность зер-

кальца. В одной из первых разработок детектором излучения была миниатюрная ионизационная камера. Гигрометр [Л. 7-11], использованный для измерения содержания водяного пара в стратосфере, имел детектор по схеме сравнения; в опорном канале α-излучение источника ослаблялось эталонным поглотителем. С его помощью вводилось предписанное значение толщины слоя конденсата; кроме того, благодаря схеме сравнения устранялось влияние на результаты измерения колебаний плотности воздуха в пространстве между источником и детектором.

Элементом сравнения служил мультивибратор, на входы которого поступали импульсы обоих каналов, прошедшие через амплитудные дискриминаторы.

Детектор с использованием бета-излучения был выполнен в виде тонкого слоя изотопа Ni^{63}, нанесенного распылением в вакууме на поверхность термоэлектрического модуля. В другой конструкции бета-излучение низкой энергии (изотоп C^{14}) рассеивалось площадкой из золота. Достоинством радиационных детекторов является высокая чувствительность. Порог чувствительности детектора с альфа-излучением соответствовал поверхностной плотности конденсата около 1 *мкг/см*^{2}, что примерно в 3 раза меньше массы, обнаруживаемой фотоэлектрическим детектором. Одной из причин этого является, по-видимому, ускорение образования росы на поверхности зеркала, которая в этих детекторах не полируется и создает ядра конденсации. По некоторым данным альфа-детектор обладает также избирательностью по отношению к фазовому состоянию конденсата.

Наряду с рассмотренными наиболее распространенными способами известны и другие, нашедшие лишь ограниченное применение. Диэлькометрический детектор был выполнен в виде многопластинчатого воздушного конденсатора, подвергаемого попеременно охлаждению и нагреву. Появление между электродами частиц льда или капельной влаги вызывает резкое изменение емкости конденсатора.

Другой емкостный детектор представляет собой конденсатор, обкладками которого являются металлическое зеркальце и расположенная параллельно на некотором расстоянии металлическая сетка. Диэлькометрические детекторы, как и кондуктометрические, дают возможность определения фазового состояния конденсата. Де-

текторы росы с пьезокварцевыми вибраторами основаны на увеличении затухания колебаний кварцевого резонатора при осаждении на его поверхности влаги. Кварцевая пластина с большим температурным коэффициентом частоты ТКЧ, имеющая охлаждаемую поверхность, соприкасающуюся с влажным газом, включается в схему электронного генератора высокой частоты. Образование пленки конденсата на поверхности кварца вызывает уменьшение амплитуды колебаний или частоты генератора. Такой детектор не следует смешивать с пьезокварцевыми гигрометрическими датчиками сорбционного типа (см. § 8-2).

Устройства для охлаждения. В автоматических гигрометрах источником холода могут служить холодильные установки небольшой производительности, компрессионного или абсорбционного типа с применением промежуточной среды — газа или жидкости для непосредственного охлаждения зеркальца. Для охлаждения можно использовать также эффект дросселирования сжатого воздуха или других газов с последующим расширением до атмосферного давления. Этот принцип использован, например, в автоматическом гигрометре ДДН-1 [Л. 0-1]. Его применение целесообразно, если требуется измерять влажность сжатых газов, так как в этом случае отпадает необходимость в посторонних источниках энергии для холодильника — источником энергии служит сам объект измерения.

Все перечисленные способы охлаждения имеют определенные недостатки. При применении охлаждающих веществ приходится периодически их восполнять; холодильные установки громоздки, имеют большую массу и высокую стоимость.

По указанным причинам и из-за затруднений, связанных с использованием перечисленных способов охлаждения в автоматической следящей системе, они находят применение в автоматических гигрометрах лишь в отдельных случаях, например для измерения очень низких температур точки росы. Как уже отмечалось, в современных промышленных гигрометрах точки росы общепринятым является термоэлектрическое охлаждение с использованием полупроводниковых элементов.

Термоэлектрическое охлаждение основано на эффекте Пельтье; основные зависимости, характеризующие это явление, приведены в литературе (см., например,

[Л. 7-12]). Для охлаждающих устройств гигрометров превалирующее значение имеет не экономичность охлаждения (расход энергии), а достигаемое понижение температуры $\Delta\theta$ (режим максимальной холодо- и теплопроизводительности). Величина $\Delta\theta$ определяется электрическими и тепловыми свойствами термоэлектродов, но не зависит от их размеров. Наиболее эффективны термопары, изготовленные из полупроводниковых материалов, например твердых растворов на основе теллурида висмута: $Bi_2Te_3+Bi_2Se_3$ — для отрицательной n-ветви термоэлемента и $Bi_2Te_3+Sb_2Te_3$ — для положительной p-ветви.

Термоэлектрические охлаждающие устройства, применяемые в гигрометрах, состоят из термоэлектрической батареи, охлаждаемой поверхности и системы отвода тепла от батареи. Для получения более низкой температуры холодного спая применяются многокаскадные термобатареи, в которых горячие спаи первого каскада опираются на холодные спаи второго, а холодные спаи третьего каскада охлаждают горячие спаи второго и т. д., чем достигается понижение температуры всех горячих спаев. Практически используются два или максимум три каскада: дальнейшее увеличение их числа малоэффективно. При наличии термоэлектрического холодильника плавное регулирование охлаждения и подогрева зеркальца, совмещенного с охлаждающей поверхностью холодильника, осуществляется весьма просто и удобно изменением силы и направления тока, проходящего через термобатарею. Уменьшению веса и габаритов гигрометров и понижению их стоимости способствует также применение типовых малогабаритных слаботочных термоэлектрических модулей.

К их недостаткам следует отнести неприменимость при очень низких температурах точки росы. Современные термоэлектрические батареи при температуре окружающей среды 20—25 °С обеспечивают охлаждение зеркальца относительно температуры окружающего воздуха до —20 °С для однокаскадного модуля, до —30÷35 °С для двухкаскадного модуля и до —45 °С — для трехкаскадного. Форсированный теплоотвод с охлаждением горячих спаев циркуляцией воды или охлаждающих смесей позволяет понизить указанные предельные температуры не более чем на несколько градусов. При этом сила тока, протекающего через модуль, находится в пределах от 3—4 до 10 *а* и больше при напряжении около 1 *в*.

Перспективы дальнейшего понижения предельной температуры и уменьшения потребляемого тока связаны с разработкой новых полупроводниковых материалов, обладающих более высокой эффективностью. Предлагалось также использовать для этой цели в сочетании с эффектом Пельтье термомагнитное охлаждение (эффект Эттингсгаузена).

Устройство для подогревания зеркальца. Простейший способ подогрева зеркальца заключается в использовании естественного притока тепла от окружающей среды и неохлаждаемых деталей прибора. При этом в автоматическом гигрометре отпадает необходимость в источнике тепла и средствах для изменения его притока. Однако такой «естественный» подогрев не обеспечивает высокого качества регулирования и, в частности, увеличивает длительность переходного процесса. Поэтому в автоматических гигрометрах обычно предусматривают искусственный подогрев, чаще всего электрическим током.

Предлагалось также использовать высокочастотный индукционный нагрев металлического зеркальца; такой нагрев отличается малоинерционностью и равномерностью, но усложняет конструкцию гигрометра и повышает его стоимость.

Как уже отмечалось, наиболее простой и удобный способ нагревания зеркальца при применении термоэлектрического модуля осуществляется реверсированием тока.

Регулирующее устройство состоит из регулятора релейного или непрерывного действия и электрического исполнительного элемента. Выбор типа регулятора рассматривается ниже. Регулятор должен не только обеспечить необходимое качество регулирования, но и обладать малыми габаритами и массой, а также высокой надежностью. При применении релейных регуляторов недопустим режим автоколебаний с большой амплитудой колебаний. В регуляторах обоих типов предпочтительны схемы, построенные на бесконтактных элементах.

Осуществление простейшего закона регулирования — пропорционального — очень упрощает схему регулирующего устройства. В качестве примера на рис. 7-10 приведена электрическая схема миниатюрного гигрометра, предназначенного для космических исследований, объем которого близок к 25 $см^3$, а масса (без цилиндрического

кожуха диаметром 24 *мм*) — 50 *г* [Л. 7-13]. Источниками питания служат две батареи напряжением 8,2 *в* (со стабилизацией кремниевым стабилизатором) и 1,5 *в*, 2 *а* для питания термопары. Детектор росы имеет два фоторезистора Φ_1 и Φ_2 (рабочий и опорный), включенные в два смежных плеча мостовой схемы, уравновешиваемой задающим потенциометром R. Выход моста подключен к трехкаскадному транзисторному усилителю; пер-

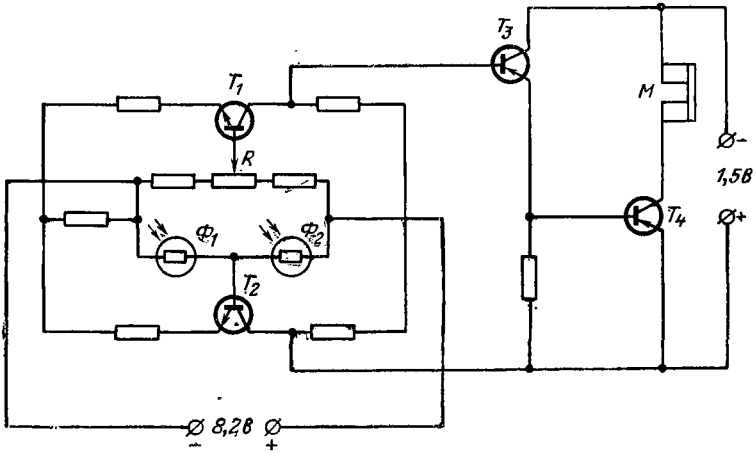


Рис. 7-10. Принципиальная схема автоматического гигрометра точки росы.

вый каскад (на триодах T_1, T_2) является дифференциальным, выходной T_4 питает термоэлектрический модуль M.

Перейдем теперь к рассмотрению характеристик гигрометра точки росы в целом. Для этого целесообразно описать гигрометр как динамическую автоматическую систему. Упрощенная структурная схема автоматического гигрометра с термоэлектрическим охлаждением [Л. 7-14], приведенная на рис. 7-11, базируется на экспериментальных динамических характеристиках отдельных элементов[1].

Согласно [Л. 7-15] модуль в нагруженном состоянии можно описать параллельным согласованным соединением двух типовых линейных звеньев: неидеального диф-

[1] Обозначения элементов и сигналов аналогичны принятым на функциональной схеме рис. 7-8.

ференцирующего и апериодического первого порядка с нелинейным оператором, зависящим от значения напряжения на термоэлементе. Полученная автором экспериментальная переходная характеристика нагруженного модуля типа ТБМ-1 показывает, что при малых отклонениях входного воздействия допустима аппроксимация модуля апериодическим звеном первого порядка. Такая аппроксимация приемлема и для модуля вместе

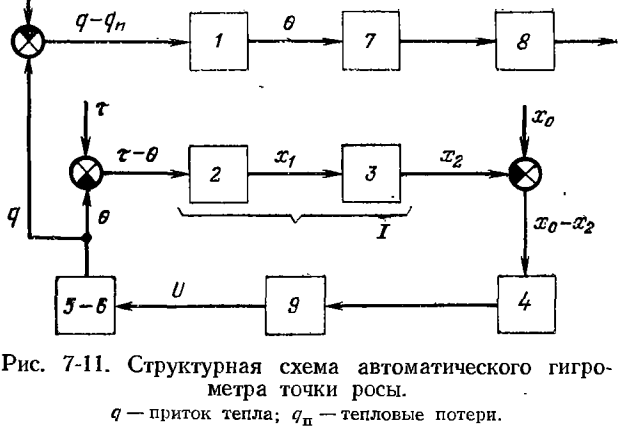


Рис. 7-11. Структурная схема автоматического гигрометра точки росы.
q — приток тепла; $q_п$ — тепловые потери.

с зеркальцем как элемента системы *II* (звенья *5-6* и *1* на рис. 7-11), так как тонкое металлическое зеркальце лишь незначительно увеличивает постоянную времени самого модуля.

Значительно сложнее описание зеркала как объекта управления следящей системы *I*. Необходимо принять во внимание сложные физические процессы и внешние воздействия, определяющие динамику процесса образования слоя росы (льда), который в автоматических гигрометрах непрерывно чередуется с процессом частичного испарения. Важнейшими являются следующие факторы: а) фазовое состояние воды на поверхности зеркальца, неправильный учет которого влечет за собой погрешности измерения; б) переменная скорость охлаждения зеркальца, сильно уменьшающаяся с понижением τ. Очень грубо эту скорость можно описать выражением $d\sigma/dt = -k(T-T_0)$, где σ — толщина слоя конденсата; T, T_0 — текущее и равновесное значения температуры зеркальца;

k — коэффициент, зависящий от T и некоторых других величин (вентиляция зеркальца). Для льда и инея величина $d\sigma/dT$ уменьшается в десятки и сотни раз по сравнению со значениями для росы; в) гистерезис характеристик слоя конденсата, в частности оптических, при образовании и испарении льда. Ширина гистерезисной петли зависит от значения τ, толщины слоя льда, а также от скорости вентиляции зеркальца; г) влияние поверхностного натяжения криволинейной поверхности, т. е. радиуса кривизны и размера капелек (эффект Кельвина), а также концентрации растворенных веществ (эффект Рауля) на равновесное давление слоя конденсата; д) эффект старения рабочей поверхности зеркальца и ее загрязнений. Особенно опасны загрязнения, конденсирующиеся при температурах, близких к измеряемым величинам τ, а также в виде твердых частиц, создающих на охлаждаемой поверхности ядра конденсации.

В автоматических гигрометрах влияние некоторых из перечисленных факторов удается ослабить. Для устранения погрешностей от загрязнений применяется ряд мер, начиная с вертикального расположения охлаждаемой поверхности и фильтрации исследуемого газа и кончая периодической очисткой этой поверхности продувкой чистым осушенным воздухом или с помощью дополнительного нагревателя. Роль формы и размеров частиц слоя росы, а также переохлаждения или перегревания зеркальца уменьшается благодаря тому, что измерения выполняются при стабилизированных параметрах слоя конденсата. Однако влиянием этих и других факторов полностью пренебречь нельзя. Математическая модель зеркальца, отражающая достаточно точно все влияющие факторы, была бы весьма сложной — нелинейной и с переменными коэффициентами.

Можно, однако, предложить упрощенную линейную модель. Характеристики объекта управления зависят не только от зеркальца и рассмотренных процессов, но и от принципа действия и параметров детектора росы; поэтому правильнее считать объектом совокупность зеркальца и детектора росы (звенья *2* и *3* на рис. 7-11) и описать его двумя моделями в зависимости от диапазона измеряемых температур точки росы τ:

а) при $\tau \geqslant \tau_{кр}$ ($\tau_{кр}$ — критическое значение, равное $-15 \div -20$ °С) вследствие высокой скорости охлаждения, достигающей нескольких десятков градусов в минуту,

лед не успевает образоваться и однозначно измеряется температура точки росы. Можно также пренебречь явлением гистерезиса и описать объект линейным инерционным звеном с передаточной функцией:

$$W_{2\text{-}3}(p) = \frac{k_{2\text{-}3}}{T_{2\text{-}3}p + 1}.$$

Значение постоянной времени $T_{2\text{-}3}$, строго говоря, зависит от τ (при $\tau < 0\,^{\circ}\text{C}$); практически можно считать $T_{2\text{-}3} = \text{const}$ (в малоинерционных гигрометрах $T_{2\text{-}3}$ не превышает нескольких секунд);

б) при $\tau < \tau_{кр}$ скорость охлаждения и нагрева уменьшается и соответственно увеличивается время, необходимое для образования льда и его испарения. Эти процессы сопровождаются гистерезисом, которым уже нельзя пренебречь. Однако в системе, удовлетворяющей в целом гипотезе фильтра (благодаря относительно большой инерционности холодильника), допустима гармоническая линеаризация звена *2-3*, имеющего петлевую (гистерезисную) релейную характеристику. Более грубо его можно аппроксимировать линейным звеном с запаздыванием $T_з$, т. е. передаточной функцией статического объекта второго порядка:

$$W_{2\text{-}3}(p) = \frac{k_{2\text{-}3}\, e^{-T_з p}}{T_{2\text{-}3}p + 1}.$$

Величина $T_з$ является функцией измеряемого значения τ и может достичь десятков секунд. Температура точки льда определяется однозначно лишь при $\tau < -35 \div -40\,^{\circ}\text{C}$ — конденсат образуется сразу в твердой фазе. Для диапазона $-35 \leqslant \tau \leqslant -20\,^{\circ}\text{C}$ существует некоторая неоднозначность при определении фазового состояния конденсата фотоэлектрическим детектором и целесообразно введение в регулирующее устройство звена задержки, обеспечивающего замерзание всего конденсата.

Если учесть, что управляемый выпрямитель (*9* на рис. 7-11) аппроксимируется безынерционным звеном, то задача синтеза системы *II* при принятых упрощающих допущениях сводится к оптимальному выбору закона регулирования и настроек регулятора *4*.

Целесообразно использовать для этого моделирование на аналоговых ЭВМ, ввиду того что, как уже отмечалось, основные параметры системы (T, $T_{2\text{-}3}$, $T_з$) являют-

ся функциями переменной τ и могут рассматриваться как постоянные лишь для определенных диапазонов изменения τ. Наиболее подходящим критерием качества регулирования для расматриваемой системы является минимизация интегральной квадратичной оценки, при которой существенно уменьшается максимальное отклонение, но допускается некоторая колебательность процесса.

В [Л. 7-14] показано, что для диапазона $\tau > -20$ °С оптимальным является регулятор пропорционального типа; для $\tau \leqslant -20$ °С (объект со звеном чистого запаздывания) рекомендуется изодромный регулятор (типа ПИ).

Выбор оптимальной настройки регулятора несложен, если диапазон изменений достаточно узок, чтобы считать параметры звеньев постоянными (например, для $-35 \leqslant \tau \leqslant -20$ °С или $-50 \leqslant \tau \leqslant -35$ °С). Задача усложняется при необходимости иметь гигрометр для широкого диапазона τ, например $-50 \leqslant \tau \leqslant +20$ °С. Можно использовать регулятор типа ПИ с настройкой по средним значениям параметров, однако в некоторых участках диапазона τ качество регулирования будет очень низким.

Радикальное решение заключается в применении регулятора с автоматической перенастройкой (изменением параметров) в функции измеряемой температуры τ, что, однако, усложнит структуру регулятора и, следовательно, гигрометра в целом. Паллиативом является автоматическая коррекция системы, причем корректирующее воздействие может формироваться в функции текущих значений температуры точки росы или силы тока термоэлектрического модуля. Оба эти параметра характеризуют динамику образования росы (льда), т. е. величину $d\sigma/dt$.

Погрешность измерения можно вычислить, исходя из уравнения Клаузиуса—Клапейрона (6-1). Абсолютная погрешность измерения упругости водяного пара e, соответствующая погрешности измерения температуры точки росы (льда) $\Delta\tau$, будет:

$$\Delta e = e \frac{L\Delta\tau}{kT_\tau^2},$$

где T_τ — температура точки росы. Погрешность измерения относительной влажности φ составит:

$$\Delta\varphi = \frac{E\Delta e + e\Delta E}{E^2}.$$

Таким образом, погрешность измерения относительной влажности определяется погрешностями измерения температуры точки росы ($\Delta\tau$) и температуры воздуха (ΔE); при этом предполагается правильное определение фазы конденсата. В свою очередь погрешность $\Delta\tau$ имеет две составляющие: первая формируется в результате влияния рассмотренных выше факторов; вторая — погрешность системы измерения температуры зеркальца — анализируется и минимизируется известными методами измерительной техники. Общая погрешность современных автоматических гигрометров точки росы не превышает $\pm 0{,}5\,°C$, а для очень низких точек льда и широкодиапазонных приборов $\pm 0{,}8 \div 1\,°C$.

Инерционность гигрометра точки росы уменьшается с увеличением скорости вентиляции и повышением абсолютной влажности воздуха. Для улучшения вентиляции иногда предусматривают сопло, направляющее исследуемый газ узкой струей на поверхность зеркальца, и уменьшают до возможных пределов массу зеркальца. Особенно важно следить за тем, чтобы скорость потока воздуха над поверхностью зеркальца была достаточно высокой, если измерения проводятся при низких температурах.

Постоянная времени современных автоматических гигрометров точки росы, как правило, не превышает нескольких секунд. Дальнейшее увеличение быстродействия гигрометра, необходимое, например, для зондирования атмосферы, достигается применением наименее инерционных измерителей температуры и предельным уменьшением массы зеркальца. Конструкция датчика должна обеспечивать минимальный теплообмен с окружающей средой, максимальную подачу и отвод тепла к зеркальцу и от него.

Известны многочисленные конструкции автоматических гигрометров точки росы. Применение в них термоэлектрического охлаждения было предложено в 1955 г. [Л. 7-16]. В последующие годы в СССР было разработано много гигрометров с полупроводниковыми термоэлектрическими холодильниками [Л. 0-1]; зарубежные приборы этого типа описаны в [Л. 0-2 и 0-9].

Было также разработано несколько других модификаций обычного метода точки росы; рассмотрим наиболее интересные.

Вихревые гигрометры основаны на использовании вихревого эффекта [Л. 7-17], реализуемого вихре-

вой трубой (труба Ранка—Хилша), которая служит генератором тепла и холода для зеркальца. Она представляет собой гладкую трубу, снабженную тангенциальным соплом, улиткой, диафрагмой с осевым отверстием и дросселем. При поступлении газа через сопло образуется интенсивный круговой поток, который разделяется на охлажденную составляющую, отводимую через диафрагму, и подогретую (периферийную), вытекающую через дроссель. С помощью дросселя можно регулировать отношение расходов холодного и горячего потоков и их температуры. В разработанных в СССР гигрометрах [Л. 7-17] применена самовакуумирующаяся вихревая трубка, работающая в режиме вакуум-насоса. Благодаря этому создается возможность прокачки и измерения влажности газов при различных значениях давления, в том числе и пониженных до 0,1 *кгс/см²*. Охлаждаемое зеркальце помещено в сопловой зоне вихревой трубы, имеющей на горячем конце щелевой диффузор; точка росы фиксируется оптическим (фотоэлектрическим) или кондуктометрическим способом. В другой конструкции вихревого гигрометра [Л. 7-18] для более глубокого охлаждения зеркальца используется принцип регенерации холода с помощью теплообменника.

Компрессионный метод точки росы [Л. 0-9] предназначен главным образом для измерений при низких температурах и нашел некоторое применение в холодильной технике. В гигрометре поддерживают постоянную температуру зеркальца и плавно повышают давление контролируемого газа до образования конденсата на зеркальце. Обозначим через p и p_1 значения давления влажного газа в исходном и конечном состояниях, а соответствующие этим давлениям парциальные давления водяного пара в газе — через e и e_1. Считая газ (с небольшим содержанием влаги) идеальным, можно написать: $e_1/e=p_1/p$.

Температура поверхности зеркальца поддерживается равной τ; при этом она может быть ниже температуры газа на незначительную величину, благодаря чему упрощается охлаждающее устройство — для охлаждения зеркальца можно использовать воду или простейший термоэлектрический модуль. Кроме того, можно устранить неоднозначность измерения точки росы, соответствующую диапазону температур, в котором возможно образо-

вание кристаллов льда или капелек переохлажденной воды; для этого достаточно повысить давление p_1.

Температуре τ соответствует давление насыщенного водяного пара E_τ. Очевидно, что $e_1 = E_\tau$, следовательно, искомая упругость водяного пара равна:

$$e = e_1 \frac{p}{p_1} = E_\tau \frac{p}{p_1}.$$

Измеряя величину давления газа p_1 в момент появления конденсата и зная температуру τ и соответствующую ей величину E_τ, можно определить значение e.

В компрессионном гигрометре регулирование температуры зеркальца заменено регулированием давления исследуемого газа. Адиабатический метод точки росы основан на охлаждении исследуемого газа путем его адиабатического расширения и определении давления в момент возникновения конденсации водяного пара.

Для воздуха основное уравнение адиабатического гигрометра имеет форму:

$$T_1 = T \left(\frac{p_1}{p}\right)^a, \qquad (7\text{-}6)$$

где $a = 0{,}287$; T, p — начальные температура и давление воздуха; T_1, p_1 — температура и давление воздуха в момент появления конденсата.

Температура T_1 равна температуре точки росы T_τ исследуемого газа.

Зная величины T и p, можно по результату измерения p_1 определить значение T_τ из формулы (7-6); на практике используются таблицы или графики градуировки, относящиеся к определенному прибору. Адиабатические гигрометры позволяют определять весьма низкие температуры точки росы (—60 ÷ —70 °С и ниже).

7-3. ГИГРОМЕТРЫ С ПОДОГРЕВНЫМИ ДАТЧИКАМИ

Принцип действия подогревных электролитических датчиков основан на зависимости максимальной упругости водяного пара над поверхностью насыщенного раствора гигроскопической соли от температуры. Чувстви-

тельный элемент датчика может изготовляться с применением кристаллов ионной соли или ее водного насыщенного раствора.

Использование кристаллов чистых солей основано на постоянстве значения влажности, при котором при неизменной температуре могут сосуществовать в равновесии друг с другом твердая соль, насыщенный раствор на ее поверхности и водяной пар в окружающей среде. Для значений влажности ниже указанного (назовем его «влажностью перехода») поверхностный слой насыщенного раствора отсутствует. Этот слой возникает при достижении влажности перехода, а при ее превышении толщина слоя увеличивается. Достижение влажности перехода легко установить по резкому увеличению электрической проводимости кристалла; дальнейшее повышение влажности влечет за собой рост проводимости.

Описанные свойства кристаллов солей использовались в некоторых простейших (релейного типа) сигнализаторах влажности воздуха.

Можно достичь точки перехода и другим путем — искусственным изменением температуры поверхности кристалла. Достижение влажностного равновесия определяется по изменению поверхностного сопротивления кристалла; для оценки влажности используются показания термометра, измеряющего температуру перехода. На таком принципе основаны гигрометры с ионным монокристаллом (чаще всего хлористого калия). Ввиду сложности конструкции и недостаточной надежности они нашли весьма ограниченное применение.

В противовес этому чрезвычайно широкое распространение получили электролитические подогревные датчики, у которых влагочувствительным элементом служит насыщенный водный раствор соли, покрывающий поверхность чувствительного элемента термометра. Как и в гигрометрах точки росы, состояние равновесия с окружающей средой достигается изменением (повышением) температуры чувствительного элемента, которая однозначно характеризует влажность окружающего газа. Преимуществом подогревного датчика является то, что равновесие достигается нагревом датчика, который осуществляется легче и проще, чем охлаждение зеркальца в гигрометре точки росы. Обычно используется насыщенный раствор хлористого лития, для которого минимальная равновесная влажность достаточно низка ($\varphi \approx 12 \div$

13% при комнатных температурах). Справочные данные об упругости водяного пара над раствором LiCl, приведенные в различных источниках, имеют некоторые расхождения; для диапазона температур от +5 до +65 °С можно использовать данные [Л. 7-19]. На рис. 7-12 [Л. 7-20] приведена зависимость максимального значения давления водяного пара над плоской поверхностью воды и насыщенного раствора LiCl от температуры. В соответствии с законом Рауля первая кривая (давления водяного пара) проходит выше второй (кривая кристаллизации LiCl). Если парциальное давление водяного пара исследуемого влажного газа выше давления насыщенного солевого раствора, последний поглощает пар. Повышая температуру раствора, можно достичь равенства обоих давлений без изменения концентрации раствора. При давлениях пара более низких, чем давление пара над поверхностью LiCl, равновесие достигается понижением температуры раствора. В обоих случаях температура, соответствующая равновесию, т. е. переходу системы в состояние, при котором сосуществуют твердая соль, насыщенный раствор и пар, однозначно определяет величину давления водяного пара. Эту температуру перехода в дальнейшем будем называть «равновесной температурой» и обозначать $t_р$.

Две особенности рассматриваемого метода непосредственно вытекают из рассмотрения кривых рис. 7-12. Во-первых, достижение равновесия повышением температуры раствора может быть достигнуто только для значений температур и давлений, находящихся в области между кривыми *1* и *2*. Во-вторых, кривая перехода для LiCl (кривая *2*) имеет несколько точек излома, соответствующих образованию перечисленных ниже гидратов соли:

Диапазон температур, °С	Ниже — 16,5	—16,5÷+19,1	+19,1÷93,6
Гидрат LiCl	$LiCl \cdot 3H_2O$	$LiCl \cdot 2H_2O$	$LiCl \cdot H_2O$

Как известно, в точках гидратного перехода изменяются электропроводность и давление пара над поверхностью раствора.

Основную характеристику датчиков — зависимость равновесной температуры от влажности окружающей газовой среды — можно построить на основании данных, приведенных на рис. 7-12.

Проще всего определить температуру точки росы τ. Так, например, равновесной температуре $t_р = 48\,°C$ (точке A на кривой *2*) соответствует точка B на кривой *1*, т. е. точка росы $\tau = 9{,}3\,°C$ и упругость водяного пара $e = 8{,}8$ *мм рт. ст.* Зависимость $\tau(t_р)$ нелинейна, однако при

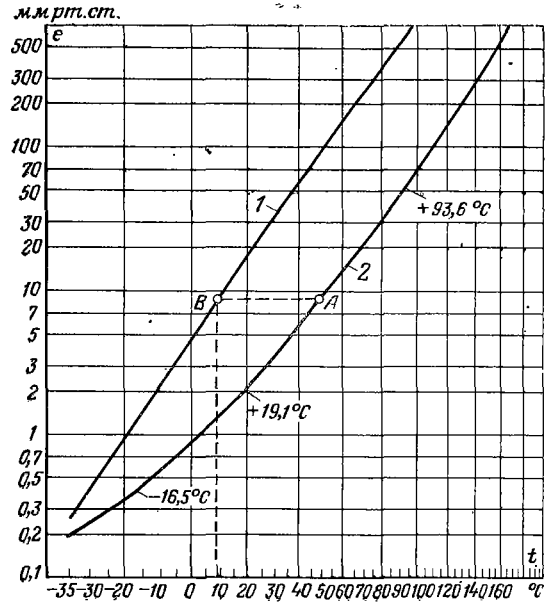


Рис. 7-12. Зависимость от температуры максимальной упругости водяного пара над поверхностью воды (*1*) и насыщенного раствора хлористого лития (*2*).

изменениях $t_р$, не превышающих 40—50 °C, ее можно линеаризовать. Так, для $-10 \leqslant t_р \leqslant +40\,°C$ была предложена зависимость: $\tau = 0{,}6977\,t_р - 24{,}33$.

Предлагались и другие эмпирические формулы. Расхождения между ними характеризуют упомянутую неоднозначность справочных данных, по которым нецелесообразно градуировать подогревные датчики.

Главной особенностью рассматриваемых датчиков является наличие следящей системы, непрерывно и автоматически приводящей чувствительный элемент к равновесной температуре. Это еще одна аналогия с автома-

тическими гигрометрами точки росы. Обычно датчик имеет чулочек, надеваемый на чувствительный элемент термометра и изготовленный из тонкого слоя гигроскопической ткани, пропитанной насыщенным раствором LiCl. Чулочек снабжается двумя проволочными электродами, позволяющими пропускать через него ток (во избежание поляризации применяется переменный ток). Ток нагревает раствор до температуры кристаллизации LiCl; образование твердой соли влечет за собой резкое увеличение сопротивления между электродами, уменьшение силы тока и температуры датчика. Понижение температуры продолжается до тех пор, пока вследствие поглощения влаги из окружающей среды вновь не повысится проводимость раствора между электродами, что повлечет за собой увеличение силы тока и повышение температуры датчика. В датчике, следовательно, будет иметь место колебательный процесс регулирования температуры вблизи среднего значения, равного равновесной температуре, соответствующей влажности газовой среды, окружающей датчик.

В датчиках рассматриваемого типа используются термометрические измерительные преобразователи различных видов, чаще всего электрические термометры сопротивления.

Общепринятым материалом для изготовления чулочка является стеклянное волокно, а для электродов — голая платиновая или серебряная проволока.

Устройство электролитического подогревного датчика показано на рис. 7-13. Проволочные электроды *1* намотаны спирально поверх чулочка из стекловолокна *2*, уложенного на термометр сопротивления *5*. Последний имеет защитную металлическую трубку *4*, покрытую слоем лака *3* для электрической изоляции и защиты от коррозии.

Защитное покрытие металлического кожуха увеличивает инерцию датчика; кроме того, ввиду большой агрессивности солевого раствора, находящегося при высоких и переменных температурах, возможен выход из строя термометра сопротивления, вызванный коррозией кожуха при образовании трещин в защитной лаковой

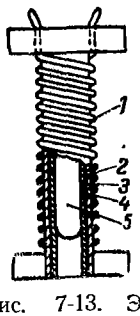


Рис. 7-13. Электролитический подогревный датчик.

пленке. Иногда защитную трубку изготовляют из нержавеющей стали или вводят термометр сопротивления в стеклянную трубку; в последнем случае инерция датчика еще больше увеличивается. В конструкции датчика по [Л. 7-21] в качестве чувствительного элемента применены малогабаритные и малоинерционные термометры сопротивления: остеклованные или керамические. В обоих случаях термочувствительный элемент герметизирован и покрыт слоем стекла, имеющим толщину не больше десятых долей миллиметра, или размещен в каналах керамического каркаса. Чулочек надевается непосредственно на термометр сопротивления. У датчиков этого типа отпадает необходимость в противокоррозионной защите и значительно уменьшается постоянная времени — до 25—30 *сек* (у остеклованного) или 30—40 *сек* (у керамического).

Значительно реже применяют в подогревных датчиках термисторы и термопары.

Электроды датчика включаются в цепь переменного тока, получаемого обычно от сети 50 *гц*, через трансформатор, вторичное напряжение которого равно 24 *в* (иногда 30 *в*). Величина этого напряжения несколько влияет на быстродействие датчика, однако повышение напряжения сверх указанных значений не дает заметного эффекта.

Если включить датчик после длительного выключения питания электродов, после пропитки свежим раствором или пребывания его в среде с высокой влажностью, то вследствие низкого сопротивления электролита ток через электроды может возрасти в 10 раз и более. Во избежание этого последовательно с электродами датчика в цепь низкого переменного напряжения включают ограничивающее сопротивление. Предлагалось также использовать понижающий трансформатор с круто падающей зависимостью вторичного напряжения от нагрузки; такая зависимость обеспечивает установление малой силы тока в цепи электродов, если их сопротивление понижается.

Прекращение питания цепи электродов может иметь и другие отрицательные последствия. При конденсации водяного пара на поверхности неподогреваемого датчика происходят стекание раствора, разбавление раствора, пропитывающего чулочек, и искажение показаний гигрометра. Это ограничивает возможность безнадзорной ра-

боты датчика, особенно при высокой влажности и низких температурах. Для устранения этого недостатка стремятся в процессе эксплуатации не выключать ток питания цепи электродов. Известны и более эффективные способы защиты, которые, однако, усложняют конструкцию и работу гигрометра, как, например, автоматическое переключение электродов на питание от батареи (через вибропреобразователь) при исчезновении

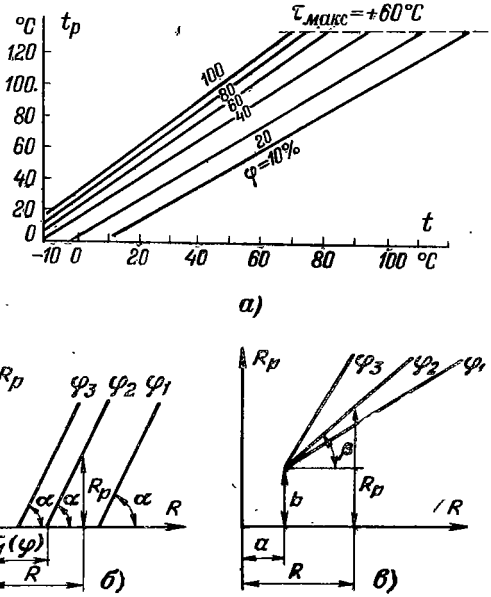


Рис. 7-14. Зависимость равновесной температуры датчика от температуры газа при $\varphi=\text{const}$ (*а*) и способы ее аппроксимации (*б*, *в*).

напряжения переменного тока [Л. 7-22]. Датчик, разработанный для автоматических информационно-измерительных метеорологических станций [Л. 7-23], включается периодически, а в промежутки времени между включениями автоматически переключается на воздух, осушенный сорбентами.

При применении электрических термометров сопротивления используются серийные вторичные приборы, предназначенные для измерения температуры, но их шкала градуируется в единицах температуры точки росы

или другой величины, характеризующей абсолютную влажность.

Более сложны устройства, предназначенные для непосредственного измерения относительной влажности. В них, кроме подогревного датчика, используется второй датчик, измеряющий температуру газа. Задача получения шкалы, градуированной в процентах относительной влажности φ, решается, как и у электрических психрометров, линейной аппроксимацией показанного на рис. 7-14,*а* семейства кривых постоянной относительной влажности в координатах $t_p(t)$, где t_p — равновесная температура датчика влажности; t — температура контролируемого газа. В обоих датчиках обычно применяются термометры сопротивления.

Имеются два способа аппроксимации:

а) семейством параллельных прямых, имеющих одинаковый угол наклона α относительно оси сопротивления термометра R (рис. 7-14,*б*).

При таком допущении значение относительной влажности φ однозначно определяется абсциссой точки пересечения соответствующей прямой $\varphi = \text{const}$ и оси R. Указанная величина $F_1(\varphi)$ связана с сопротивлениями R_p — термометра датчика влажности и R — температурного датчика следующей зависимостью:

$$F_1(\varphi) = R - R_p \operatorname{ctg} \alpha.$$

Для воспроизведения этой зависимости применяется мостовая измерительная схема (рис. 7-15,*а*), в которой одно плечо моста образовано термометром сопротивления R, а в смежное плечо включен термометр сопротивления R_p с последовательным и параллельным добавочными сопротивлениями, величина которых подбирается для получения постоянного значения $\operatorname{ctg} \alpha$. Разность сопротивлений смежных плеч измеряется логометром *Л* или другим дифференциальным указателем в измерительной диагонали моста;

б) веерообразным пучком прямых, пересекающихся в точке с постоянными координатами — абсциссой a и ординатой b (рис. 7-14,*в*). Аналогичный способ применяется и в автоматических психрометрах (рис. 7-5); мерой относительной влажности является величина угла между соответствующей прямой и осью абсцисс:

$$F_2(\varphi) = \operatorname{ctg} \beta = (R - a)/(R_p - b).$$

Для измерения $F_2(\varphi)$ по этому способу используется схема (рис. 7-15,*б*), состоящая из двух мостов и автоматического потенциометра *К*, на вход которого подается разность потенциалов между вершиной температурного моста и движком уравновешивающего реохорда *Р*. Практически оба моста имеют два общих (постоянных) плеча и один источник питания. Сопротивления плеч мостов

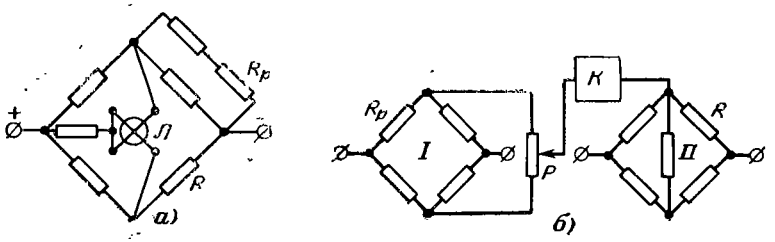


Рис. 7-15. Измерительные схемы гигрометров с подогревными датчиками и шкалой в единицах относительной влажности.

подбирают так, чтобы выходные напряжения небаланса были равны: у моста влажности (*I*) $U_I=k(R_р-b)$, у температурного моста (*II*) $U_II=k(R-a)$ (k — коэффициент пропорциональности).

На вход компенсатора поступает напряжение, равное разности U_II-U_x (U_x — напряжение между движком реохорда и общей вершиной обоих мостов). В момент компенсации $U_x=U_II$, т. е.

$$x=rU_II/U_I=r(R-a)/(R_р-b),$$

где r — полное сопротивление реохорда; x — сопротивление его участка между началом и движком.

При аппроксимации по обоим способам шкала измерительного прибора в процентах относительной влажности неравномерна; цена деления уменьшается с ростом φ. Способ, указанный в п. «б», более точен.

Динамические свойства электролитического подогревного датчика можно описать различными математическими моделями. Простейшая из них представляет собой инерционное звено второго порядка. Для более точного описания необходимо ввести в структурную схему отрицательную обратную связь, характеризующую зависимость упругости водяного пара над поверхностью чулоч-

ка (над насыщенным раствором LiCl) от ее температуры.

На основании ранее разработанных аналитических описаний Ф. Бернгард [Л. 7-24] предложил структурную схему датчика, которой соответствует передаточная функция:

$$W(p)=\frac{t_{\text{д}}(p)}{a(p)}=\frac{1}{V_0}\,\frac{1+pT_D}{1+p\dfrac{2D}{\omega_0}+\dfrac{p^2}{\omega_0^2}}, \qquad (7\text{-}7)$$

где $t_{\text{д}}$ — температура термометра; a — абсолютная влажность воздуха; $1/V_0$ — коэффициент усиления; T_D — постоянная времени; D — степень демпфирования (затухания); ω_0 — собственная частота незатухающих колебаний.

Значения перечисленных коэффициентов определяются параметрами датчика, параметрами процесса тепло- и массообмена с окружающей средой и температурной характеристикой максимальной упругости водяного пара над насыщенным раствором LiCl. Кроме того, коэффициенты уравнения датчика зависят от режима его работы — от величины напряжения, приложенного к электродам, и, что самое важное, от величины измеряемой влажности.

Таким образом, если даже отказаться от рассмотрения датчика с распределенными параметрами, приходится считаться с его нелинейностью и переменностью коэффициентов. Однако, ограничиваясь малыми отклонениями от рабочей точки (от состояния равновесия), можно рассматривать датчик как линейную систему. У реальных датчиков величина постоянной времени T_D мала и в соответствии с (7-7) датчик можно аппроксимировать линейным колебательным звеном 2-го порядка. Экспериментальные переходные и частотные характеристики реальных подогревных датчиков подтверждают возможность такой аппроксимации.

Для аналитического получения модели подогревного датчика в [Л. 7-25] использованы уравнения теплового баланса, составленные отдельно для чулочка с нагревателем и для термометра сопротивления. Передаточная функция датчика имеет вид:

$$W(p)=\frac{t_{\text{д}}(p)}{e(p)}=\frac{Z_1p+Z_2}{(Y_1p+1)(Y_2p^2+Y_3p+Y_4)-Y_5}, \qquad (7\text{-}8)$$

где $t_д$ — выходная величина датчика температуры; e — упругость водяного пара исследуемого воздуха; Z_1, Z_2, Y_1—Y_5 — коэффициенты, характеризующие параметры пропитанного чулочка и термометра, а также условия теплообмена.

Можно отметить аналогию между формой передаточных функций (7-7) и (7-8); последняя отличается введением дополнительного инерционного звена — множителя (Y_1p+1) в знаменателе.

Математическая модель (7-8) была использована для выбора оптимальных параметров подогревного датчика при помощи моделирования на АВМ, причем критерием оптимальности являлась минимизация длительности переходного процесса. С целью минимизации квадратичной интегральной оценки рекомендуется поддерживать скорость воздуха, омывающего чувствительный элемент датчика, в пределах 0,09—2 *м/сек*.

Для повышения быстродействия датчика следует уменьшать междувитковое расстояние электродов и плотность материала чулочка и увеличивать сорбционную поверхность чувствительного элемента.

В заключение нужно еще раз отметить нелинейность характеристик реальных датчиков при значительных отклонениях от установившегося значения. Одно из ее проявлений заключается в значительном уменьшении быстродействия датчика при понижении температуры (в области отрицательных температур).

Рассмотрим статические свойства гигрометров с электролитическими подогревными датчиками. Как уже указывалось, эти датчики можно использовать лишь в определенных пределах колебаний влажности и температуры контролируемой газовой среды. Нижняя граница определяется условием $t_р \geqslant t$ ($t_р$ — равновесная температура датчика; t — температура газа). Это условие вытекает из самого принципа устройства и действия датчика. По температуре нижний предел измерений ограничен тем обстоятельством, что кривые давления водяного пара и кристаллизации LiCl (*1* и *2* на рис. 7-12) пересекаются при $t \approx -36$ °С, в связи с чем минимальную температуру газа ограничивают не точкой замерзания насыщенного раствора LiCl, а величиной, близкой к $\tau_{мин} = -30$ °С.

Область высоких температур менее ограничена; давление водяного пара над растворами LiCl измеряли при

температурах до 180 °С. Однако при температурах выше 100 °С датчики работают неустойчиво.

Обычно ограничиваются измерением точки росы не выше $\tau_{макс}=60$ °С при температуре газа не выше 100 °С.

Указанные ограничения ($\tau_{мин}=-30$ °С, $\tau_{макс}=60$ °С и $t_{макс}=100$ °С, а также $t_р>t$) определяют область применения, показанную заштрихованной площадью на графиках, построенных в координатах: абсолютная влажность или точка росы — температура газа (рис. 7-16,*а*) и относительная влажность — температура газа (рис. 7-16,*б*). Из графиков видно, что если при отрицательных температурах около —20 °С можно измерять только высокую относительную влажность (от 55—60 до 100%), то с по-

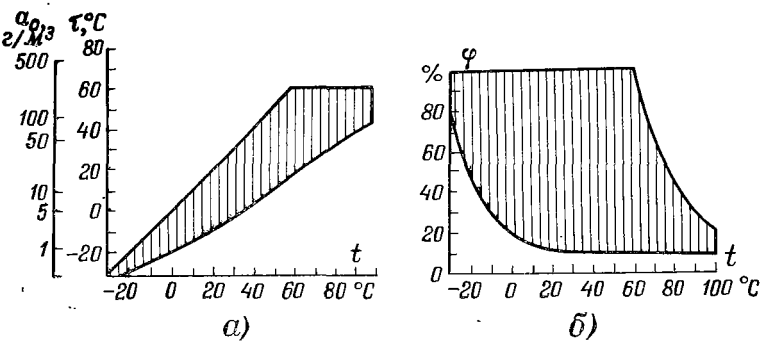


Рис. 7-16. Пределы применения электролитических подогревных датчиков.

а — в единицах абсолютной влажности (при 0 °С и 760 *мм рт. ст.*) и точки росы; *б* — в единицах относительной влажности.

вышением температуры нижний предел измеряемой влажности понижается. В интервале температур от 15 до 50 °С можно измерять φ в пределах от 13—15 до 100%. Этот диапазон наиболее благоприятен для применения подогревных датчиков.

Важным фактором, определяющим пределы и точность измерения, является изменение кристаллогидратного состояния хлористого лития (см. стр. 249). Некоторые авторы считают невозможным измерение в области равновесных температур ниже $t_р=19{,}1$ °С, соответствующей переходу от водного соединения $LiCl\cdot H_2O$ к высшему кристаллогидрату $LiCl\cdot 2H_2O$. Такое условие ограничивает

нижний предел измерений температурой точки росы $\tau_{мин} \approx -10$ °С. Практически благодаря большей устойчивости моногидрата переход к дигидрату происходит при более низких температурах τ. Однако в областях, близких к гидратному переходу, может возникнуть неоднозначность показаний гигрометра. В зависимости от направления перехода датчик может работать на линии моногидрата или дигидрата, причем разность равновесных температур $\Delta t_р$ составляет при $\tau = -20$ °С $\Delta t_р = 3{,}4$ °С, а при $\tau = -30$ °С $\Delta t_р = 5{,}4$ °С [Л. 7-26]. Вторая зона неопределенности соответствует диапазону $34 \leqslant \tau \leqslant 41$ °С.

В. А. Усольцев [Л. 7-23] считает, что лавинообразный процесс образования высших кристаллогидратов вызывают локальные понижения температуры чулочка. Применив малогабаритный датчик со специальным режимом включения (переход от осушенного воздуха к влажному), он не наблюдал погрешностей от изменения кристаллогидратного состояния соли вплоть до $\tau = -40$ °С.

Вторым существенным фактором является температура t исследуемого газа. Естественная выходная величина влагочувствительного элемента датчика — равновесная температура $t_р$ раствора LiCl на поверхности чулочка — консервативна в отношении температуры окружающей среды. Однако выходная величина датчика в целом может отличаться от $t_р$ на величину, зависящую от градиента температур поверхности чулочка и чувствительного элемента.

На величину температурного градиента влияют как количество выделяемого тепла (величина, меняющаяся в широких пределах в зависимости от режима работы датчика), так и температура окружающей среды. Поэтому температура окружающей среды влияет на быстродействие и динамические погрешности датчика. О влиянии t на статическую характеристику датчика существуют противоречивые мнения. Некоторые исследователи [Л. 0-4] считают необходимым введение поправки на температуру окружающего газа, т. е. рассматривают ее изменения при точке росы $\tau = \text{const}$ как источник систематической погрешности датчика. Известен ряд предложений, направленных на устранение этой погрешности. Предлагалось автоматически вводить в результат измерения поправку, являющуюся функцией t и τ, или работать на одной и той же точке сорбционной изотермы

стекловолокна, для чего применялась система автоматической стабилизации силы тока нагрева датчика.

Указанные способы сильно усложняют датчик или измерительное устройство, а необходимости учета температуры t противоречат экспериментальные данные, относящиеся к подогревным датчикам различных типов. Погрешности от изменений t, как и некоторые другие свойства датчиков, зависят от их конструктивного выполнения. При наличии в датчике металлической гильзы, покрытой слоем лака, или защитной стеклянной трубки, толстого слоя стекловолокна и т. п. существует установившийся (остаточный) градиент температур между поверхностью чулочка и чувствительным элементом термометра; рациональная конструкция датчика устраняет или минимизирует этот градиент и температурную погрешность.

Подогревные датчики могут работать в любых средах, не воздействующих на раствор LiCl и не являющихся взрывоопасными.

Обычные изменения атмосферного давления не оказывают влияния на характеристики подогревных датчиков. Они могут работать и при повышенных давлениях — до нескольких сотен *кгс/см*^{2}. В этих условиях необходимо принимать меры для устранения повышенных потерь тепла датчика в окружающую среду, которые могут в пределе превысить приток тепла от нагревателя. Одним из возможных решений является подогрев газа, находящегося под высоким давлением, до его соприкосновения с чувствительным элементом датчика.

В отличие от психрометрических датчиков подогревные работают без значительных погрешностей в неподвижном воздухе. Напротив, повышение скорости газа выше определенного предела (несколько метров в секунду) нежелательно, так как это приводит к усиленному охлаждению чувствительного элемента и нарушению его нормальной работы. Аналогичное явление наблюдалось и при работе подогревных датчиков в газовых смесях с высоким содержанием (свыше 50%) водорода, обусловливающим значительное повышение теплопроводности газа.

В промышленных гигрометрах чувствительный элемент датчика для защиты от сильных воздушных потоков (а также для уменьшения отложений пыли) обыч-

но закрывают металлической сеткой. Увеличение (в допустимых пределах) скорости газового потока повышает быстродействие датчика, а наличие защитной сетки уменьшает его.

Подогревные датчики значительно менее чувствительны к механическим (электрически непроводящим) загрязнениям и запылению, чем гигрометрические датчики большинства других типов. В случае сильного загрязнения чулочек промывают или кипятят в дистиллированной воде, а затем пропитывают вновь раствором LiCl; повторная пропитка восстанавливает нормальную работу датчика и после стекания раствора.

Подогревные датчики взаимозаменяемы и могут иметь единую стандартную градуировку, если этим качеством обладают использованные в них термометрические датчики.

Погрешности от старения серийных подогревных датчиков при испытаниях в течение 17 мес. [Л. 7-27] составляли в среднем ±0,5 °С (по температуре точки росы).

Как вытекает из сказанного, электролитические подогревные датчики обладают определенными преимуществами по сравнению с другими. С применением этих датчиков легко автоматизировать контроль и регулирование влажности. Они обладают большей надежностью и требуют меньшего ухода, чем электрические гигрометры других типов. Однако преимущества подогревных датчиков можно реализовать только в рассмотренных выше пределах их применения; эти пределы уже, чем в ряде электрических гигрометров других типов, что является существенным недостатком. Точность этих датчиков тоже не всегда достаточна.

Электролитические подогревные датчики, появившиеся в конце 40-х годов, имеют широкую область применения, охватывающую метеорологические измерения (включая телеметрические системы), контроль и регулирование влажности в промышленности, в системах кондиционирования воздуха производственных и жилых помещений, в установках централизованного контроля влажности воздуха в складских помещениях, корабельных трюмах и т. п. Миниатюрные подогревные датчики применяются в научных исследованиях, например, для измерения влажности воздуха между телом человека и отдельными слоями его одежды.

Глава восьмая

ГИГРОМЕТРЫ С ЭЛЕКТРИЧЕСКИМИ ДАТЧИКАМИ ВЛАЖНОСТИ

8-1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ. ЭЛЕКТРОЛИТИЧЕСКИЕ ДАТЧИКИ

Электрические гигрометрические датчики (ЭГД) имеют чувствительный элемент, выполненный из гигроскопического материала, который при измерениях влажности находится в гигротермическом равновесии с контролируемым газом. Выходной величиной ЭГД является тот или иной электрический параметр влагочувствительного элемента.

Попытки создания первых ЭГД относятся к 20-м годам XX в.; значительное развитие таких датчиков произошло в последние 20—25 лет. Основной толчок этому дало использование ЭГД в аэрологических измерениях, в частности для измерения влажности воздуха при радиозондировании атмосферы. Измерение влажности воздуха и других газовых сред остается основной областью применения ЭГД. Наряду с этим их применяют также для измерения влагосодержания жидких диэлектриков и твердых материалов (см. § 10-2).

ЭГД имеют ряд преимуществ по сравнению с другими гигрометрическими датчиками. Они могут работать как в неподвижном газе, так и при изменении его скорости в широких пределах. Все ЭГД, кроме кулонометрических, не требуют применения подводящих коммуникаций, регуляторов расхода или давления газа. Благодаря возможности миниатюризации, ЭГД можно применять для измерения влажности очень малых объемов газа, для исследования полей влажности и измерений в труднодоступных местах.

Достоинствами ЭГД являются простота конструкции, возможность дистанционных измерений, низкая стоимость, малые габариты и масса. Основным недостатком многих ЭГД является недостаточная устойчивость их характеристик во времени, т. е. старение датчиков в процессе эксплуатации или хранения. С точки зрения их назначения ЭГД можно разделить на две группы:

а) ЭГД для радиозондов, являющиеся по существу датчиками разового действия;

б) ЭГД для метеорологических или производственных гигрометров, рассчитанные на длительную работу.

Технические требования к датчикам обеих групп различны ввиду большой разницы в условиях работы. В радиозондах ЭГД должны работать при скорости подъема около 300 *м/мин* и при значительных изменениях параметров воздуха. В течение 60—90 *мин* давление воздуха может измениться от 750 до 10 *мм рт. ст.*, а температура — от 40 до —70 °С. Датчик должен измерять относительную влажность в диапазоне от 0 до 100%, иногда при наличии дождя или снега. Следовательно, важнейшими требованиями к датчику являются минимальная инерционность и хорошие метрологические качества при любых величинах относительной влажности и при низких отрицательных температурах. Конденсация влаги на поверхности чувствительного элемента не должна выводить ЭГД из строя; после испарения конденсата его градуировка должна восстанавливаться. Для ЭГД второй группы важнейшим качеством является длительная устойчивость характеристик в рабочих условиях. Эти датчики могут быть рассчитаны на более узкие диапазоны температуры и влажности газа; к их быстродействию, размерам и весу в большинстве случаев предъявляются менее жесткие требования. Иногда они должны работать при наличии в газе пыли или агрессивных примесей.

Требованиями, общими для обеих групп, являются ограничение величины гистерезиса (несовпадение характеристик ЭГД при повышении и понижении влажности) и взаимозаменяемость датчиков одного типа.

В литературе (в частности, патентной) описаны многочисленные ЭГД, отличающиеся принципом действия, влагочувствительным материалом и конструкцией. Однако датчиков, которые удовлетворяли бы всем перечисленным требованиям, нет; лишь некоторые из известных ЭГД нашли практическое применение. Разработка более совершенных ЭГД продолжается и в настоящее время. Ниже принято деление ЭГД на электролитические, сорбционные и кулонометрические. Такая классификация несколько условна, так как процессы сорбции и десорбции влаги происходят в датчиках всех трех типов. Однако в то время как у сорбционных ЭГД только эти процессы определяют механизм действия датчика, влагочувствительные элементы датчиков первой группы содержат электролиты (растворы гигроскопических солей или, реже, кислот), которые используются и в качестве сорбента и в качестве источника ионов. Наконец, в кулонометри-

ческих датчиках параллельно с сорбцией и десорбцией влаги имеет место ее разложение электролизом.

В электролитических ЭГД выходной величиной, как правило, является электропроводность ненасыщенных водных растворов неорганических кислот или солей. Известно, что при одной и той же температуре давление насыщенного водяного пара над таким раствором ниже, чем давление насыщенного пара над поверхностью растворителя, т. е. чистой воды (закон Рауля). Чувствительный элемент электролитического ЭГД — обычно жидкая или сухая пленка электролита — поглощает влагу из окружающей среды до тех пор, пока давление пара над поверхностью образующегося раствора недостигнет равновесия с давлением водяного пара окружающей среды. Дальнейшее изменение влажности среды в зависимости от знака этого изменения вызовет поглощение влаги чувствительным элементом или испарение ее до достижения нового состояния равновесия.

Сопротивление электролитической пленки R_x изменяется в зависимости от температуры и концентрации растворенного вещества. Последняя в свою очередь зависит от влажности окружающего газа; эту зависимость (при постоянной температуре) можно описать следующими упрощенными уравнениями [Л. 8-1]:

$$R_x = \frac{l}{\varkappa bd} = \frac{l^2}{\varkappa V}, \qquad (8\text{-}1)$$

где l, b, d — соответственно длина, ширина и толщина слоя электролита между электродами, *см*; V — объем электролита, $см^3$; $\varkappa$ — его удельная проводимость, $ом^{-1} \cdot см^{-1}$.

Объем электролита связан с концентрацией n, выраженной в грамм-эквивалентах на 1 $см^3$, соотношением

$$n = m/e_в V,$$

где m — масса растворенного вещества между электродами; $e_в$ — химический эквивалент этого вещества.

После подстановки в (8-1) получим:

$$R_x = \frac{l^2 e_в}{m} \frac{n}{\varkappa} = \frac{l^2 e_в}{m} \frac{1}{\lambda}, \qquad (8\text{-}2)$$

где $\lambda = \varkappa/n$ — эквивалентная электрическая проводимость раствора.

Для определения статической характеристики электролитического ЭГД — функции $R_x(\varphi)$ необходимо знать:

а) зависимость концентрации электролита, применен-

ного в чувствительном элементе, от относительной влажности воздуха φ; эту зависимость можно найти, используя справочные данные о значениях упругости насыщенного водяного пара над растворами различной концентрации.

б) зависимость эквивалентной проводимости от концентрации электролита.

Электролитические ЭГД на практике градуируют эмпирически, так как приведенный выше элементарный анализ их характеристик не учитывает влияния ряда факторов, в частности введения в электролитическую пленку связующих веществ (см. ниже), сказывающегося особенно сильно при малых концентрациях растворенного вещества.

Статическую характеристику электролитических ЭГД при постоянной температуре можно описать различными эмпирическими зависимостями, в частности степенной:

$$R_x = R_0 \varphi^{-a}, \qquad (8\text{-}3)$$

где R_0 — начальное сопротивление ЭГД; φ — относительная влажность; a — постоянная, зависящая от типа датчика. Соотношению (8-3) соответствует линейная связь между логарифмами R_x и φ; в [Л. 8-2] для хлористолитиевых ЭГД предложена зависимость

$$\lg \gamma = S \lg \varphi,$$

где γ — проводимость датчика; S — коэффициент, постоянный для изменений γ в пределах двух порядков.

В широком диапазоне изменений γ (и, следовательно, относительной влажности) коэффициент S является функцией φ — тоже линейной.

Для ряда ЭГД (например, полиэлектролитических) можно принять экспоненциальную зависимость

$$R_x = R_0 e^{-b\varphi},$$

где b — постоянная, характеризующая датчики определенного типа.

Однако с помощью приведенных и других эмпирических уравнений на практике нельзя осуществить градуировку ЭГД расчетным путем. В большинстве случаев даже для нескольких экземпляров датчиков одного типа постоянные, фигурирующие в этих уравнениях, имеют разные значения.

Чувствительность электролитического датчика можно определить из уравнения (8-2):

$$\frac{\partial R_{\text{ж}}}{\partial \varphi} = -\frac{l^2 e_{\text{в}}}{m} \frac{\partial \lambda / \partial \varphi}{\lambda^2}, \qquad (8\text{-}4)$$

Из (8-4) видно, что для увеличения чувствительности измерения необходимо увеличить расстояние между электродами l; датчик должен иметь максимально развитую поверхность при минимальном объеме — это необходимо и для повышения его быстродействия. При прочих равных условиях применение в ЭГД более концентрированного раствора (увеличение m и λ) уменьшает чувствительность датчика. Среди известных электролитических ЭГД можно выделить несколько типов, отличающихся друг от друга устройством влагочувствительного элемента. У простейших ЭГД раствор электролита находится на поверхности водостойкой подложки без применения каких-либо вспомогательных связующих или пленкообразующих материалов.

У датчика, разработанного в Швейцарии, на основание из твердого диэлектрика нанесены распылением два электрода из благородного металла, соединенные кварцевым или стеклянным цилиндрическим стержнем диаметром около 0,2 *мм*. Клинообразный зазор между стержнем и поверхностью основания заполнен раствором LiCl с некоторыми добавками, удерживаемым капиллярными силами. ЭГД рассматриваемого типа имеют высокую чувствительность (также и в диапазоне низкой влажности), но вследствие опасности стекания раствора не обладают достаточной надежностью. Датчик этого типа (с некоторыми конструктивными изменениями) нашел применение во влагомерах гигротермического равновесия (см. § 10-2). На изменении проводимости жидкости в результате поглощения влаги основан также гигрометр «Ионофлюкс», выпускаемый в ФРГ [Л. 0-9].

Важнейшей разновидностью электролитических ЭГД являются хлористолитиевые датчики, предложенные Данмором (Dunmore) свыше 30 лет тому назад для измерения влажности при радиозондировании атмосферы. Обзор развития конструкции и технологии изготовления этих датчиков приведен в [Л. 8-3]. В первых датчиках раствор LiCl наносился на подложку без добавок вспомогательного вещества.

Существенным усовершенствованием явилось приме-

нение смеси электролита со связующим — органическим пленкообразующим веществом, обладающим высокой влагопроницаемостью, хорошей адгезией по отношению к поверхности подложки и хорошо смешивающимся с электролитом. Добавление связующего способствует равномерному распределению электролита, облегчает получение взаимозаменяемых ЭГД и повышает их устойчивость; в то же время оно увеличивает инерцию ЭГД. Наибольшее применение в качестве связующего получил поливиниловый спирт (частично гидролизованный поливинилацетат).

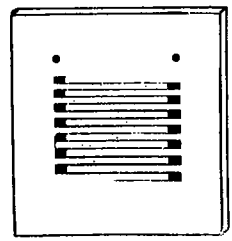


Рис. 8-1. Хлористолитиевый гигрометрический датчик с гребенкообразными электродами.

Хлористолитиевые ЭГД выпускаются в настоящее время в ряде стран не только для радиозондов, но и для промышленных применений в следующих конструктивных исполнениях: а) цилиндрические датчики с основанием в виде металлической трубки или цилиндра из твердого диэлектрика (полистирол, оргстекло) и с проволочными электродами из благородных металлов; б) полосковые датчики, имеющие в качестве подложки прямоугольную пластину полистирола, покрытую с обеих сторон влагочувствительным слоем. Электроды из платины, родия, цинка или олова напыляют в виде полосок на края пластины; в) датчики с двумя гребенкообразными параллельными электродами (обычно золотыми), наносимыми распылением на пластину из полистирола или оргстекла (рис. 8-1). Влагочувствительная пленка на поверхности пластины перекрывает узкий зазор между электродами.

Для большого диапазона измеряемой влажности выпускаются датчики, представляющие собой набор из ЭГД с различной концентрацией LiCl; повышение концентрации соли смещает характеристику $R_x(\varphi)$ в область более низкой влажности. На рис. 8-2 приведено семейство статических характеристик такого комплекта ЭГД.

С целью обеспечения взаимозаменяемости датчиков технология их изготовления предусматривает, кроме стабилизации размеров основания и электродов и способа нанесения раствора, также возможность регулирования соотношения поливинилового раствора и хлористого ли-

тия в растворе. В датчиках П. С. Габрусенка связующим служит желатин, подвергшийся дублению; последний вариант этих ЭГД [Л. 8-4] имеет подложку из триацетатной основы и хлорсеребряные электроды.

Известен ряд конструкций миниатюрных хлористолитиевых ЭГД. Один из первых, предназначенный для установки в медицинской игле, имел два платиновых электрода диаметром 0,1 и 0,3 *мм*, разделенных полистиролом и стеклом, на поверхность которых наносилась влагочувствительная пленка. Для измерений влажности воздуха над поверхностью листьев был разработан ЭГД, основанием которого служила часть предметного стекла площадью 2×12 *мм* и толщиной 1 *мм*. Миниатюрные и

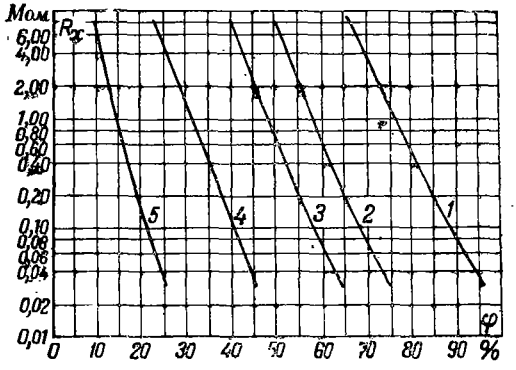


Рис. 8-2. Зависимость сопротивления R_x от относительной влажности φ для пяти хлористолитиевых датчиков с различной концентрацией LiCl.

1 — поливинилацетат без LiCl; *2* — 0,25% LiCl; *3* — 0,5% LiCl; *4* — 1,05% LiCl; *5* — 2,2% LiCl.

малогабаритные хлористолитиевые датчики применялись также для изучения микроклимата между человеческим телом и одеждой. Кроме хлористого лития в ЭГД применялись и другие соли, например, хлористые соли свинца, циркония, Na_2CO_3, $CaSO_4$, NaCl, K_2SO_4.

В датчиках, разработанных Н. Е. Осиповой [Л. 8-4], влагочувствительная пленка состоит из смеси растворов двух солей: сегнетовой ($KNaC_4H_7O_6 \cdot 4H_2O$) и поваренной. Она наносится на полый цилиндрический каркас из органического стекла или полистирола, снабженный платиновыми или нихромовыми проволочными электродами.

В США были разработаны тонкопленочные электролитические датчики, предназначенные преимущественно для аэрологических исследований и отличающиеся малой инерционностью. Тончайший слой гигроскопической соли наносится испарением в вакууме на плоскую подложку из гидрофобного материала (стекла, кварца, полистирола). Электроды, чаще всего гребенкообразные, разделенные зазором малой ширины, изготовляются техникой печатных схем или испарением в вакууме на поверхности подложки или поверх влагочувствительного слоя. Заданную конфигурацию электродов получают с помощью маски соответствующей формы. Такая технология изготовления обеспечивает механическую прочность датчика. Влагочувствительный элемент изготовлялся с применением различных солей. Первоначально использовали метафосфат калия; эти ЭГД имели очень большое сопротивление при низкой влажности. В последующем применялся фтористый барий, а в последних конструкциях — йодид свинца (PbJ_2) [Л. 8-5].

Известны электролитические ЭГД, в которых влагочувствительный элемент выполняется из пористых материалов, пропитанных электролитом, неагрессивным в отношении пористого материала. В таких датчиках применялись естественные и искусственные волокна: шелк, хлопок, вискоза и ткани из них, а также человеческий волос, бумага, асбестовый картон и т. д. Одну из разновидностей указанных датчиков составляют ЭГД, у которых чувствительный элемент выполнен из керамики, пропитанной электролитом.

Особый класс ЭГД образуют полиэлектролитические датчики с чувствительным элементом в виде пленки гидрофильной ионообменной смолы. В результате сорбции водяного пара ионы, связанные в полимере электростатическими силами, становятся подвижными и проводимость пленки увеличивается; при высокой влажности превалирующее значение имеет ионная проводимость.

Датчики, предложенные М. Поупом [Л. 8-6], имели основание из поверхностно сшитого полистирола, содержащего некоторое количество дивинилбензольных сшивок. Влагочувствительную пленку на его поверхности создавали сульфированием в концентрированной серной кислоте при температуре 100 °С. Увеличивая длительность сульфирования, можно уменьшить сопротивление поверхностного слоя. Электроды из благородного металла

напыляются на влагочувствительную пленку. Другой способ изготовления датчиков [Л. 8-7] заключается в напылении тонкой пленки ионообменной смолы на основание в виде пластины из полистирола, стекловолокна, пропитанного эпоксидной смолой, и т. п. Предварительно на поверхности пластины печатной техникой изготовляют гребенкообразные электроды, разделенные узким зазором (0,5 *мм* и меньше). По аналогичной методике были изготовлены датчики «хьюмисторы» для радиозондов [Л. 8-6].

Датчик, разработанный З. З. Пинчуком [Л. 8-4], имеет керамическое основание в форме диска, влагочувствительную пленку из термообработанного линейного сульфополистирола и два платиновых спиральных электрода; он охватывает диапазон от 40 до 95% относительной влажности (для температур 5—35°С). В ЭГД, разработанном Агрофизическим научно-исследовательским институтом и названном «Гигристор» [Л. 8-7], влагочувствительный элемент представляет собой пленку органического полупроводника — термически обработанного полиакрилонитрила, нанесенную на стеклянную или кварцевую пластину. Серебряные электроды наносятся на пластину вжиганием с последующим процарапыванием гребенкообразной линии. Датчик измеряет относительную влажность 50—100% при температурах от 15 до 45°С; в области более низкой влажности датчик имеет очень высокое сопротивление. Испытания датчиков последних двух типов [Л. 8-4] выявили их свойства, характерные и для других полиэлектролитических ЭГД: малую инерционность, возможность работы при высокой относительной влажности и обеспечения взаимозаменяемости. Наряду с этим датчики имеют гистерезис в 2—3% относительной влажности и высокие температурные коэффициенты, различные по величине на разных участках градуировочной кривой. Их основной недостаток — старение и нестабильность во времени.

Несмотря на разнообразие конструктивного оформления и способов изготовления, электролитические ЭГД имеют ряд общих свойств. У большинства датчиков верхний предел измеряемой влажности ограничен тем, что длительное пребывание ЭГД в газе с относительной влажностью, близкой к 100%, может вызвать нарушение градуировки и даже разрушение чувствительного элемента. Ограничен также и нижний предел; он определя-

ется значением давления водяного пара над насыщенным раствором электролита, примененного в данном ЭГД. Если влажность исследуемого газа уменьшается ниже величины, при которой раствор электролита ЭГД (при данной температуре) становится насыщенным, дальнейшее испарение воды из электролита вызывает появление сухого вещества, не проводящего электрический ток.

Температура имеет значительное влияние на основную характеристику ЭГД, так как обе функции, определяющие свойства ЭГД (зависимость концентрации электролита от влажности и зависимость его проводимости от концентрации), в свою очередь зависят от температуры. Характер температурной зависимости проводимости

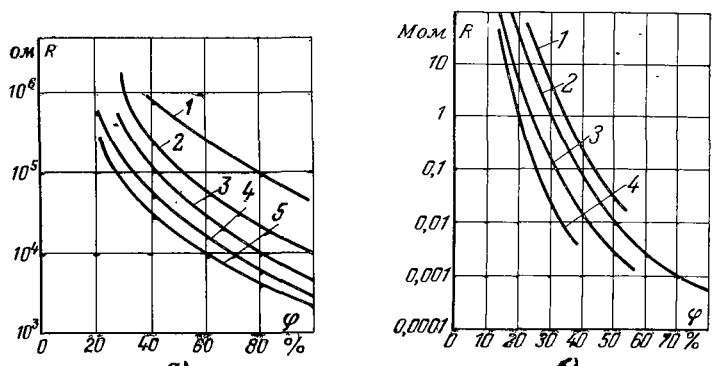


Рис. 8-3. Зависимость сопротивления хлористолитиевого ЭГД от влажности воздуха.

а — при температурах: *1* — —40 °С; *2* — —20 °С; *3* — 0 °С; *4* — +20 °С; *5* — +40 °С; *б* — при давлениях: *1* — 610 *мм рт. ст.*; *2* — 762 *мм рт. ст.*; *3* — 910 *мм рт. ст.*; *4* — 1 140 *мм рт. ст.*

у ЭГД такой же, как у водных растворов электролитов: при постоянной относительной влажности повышение температуры уменьшает сопротивление датчика. На рис. 8-3,*а* приведено семейство градуировочных кривых $R(\varphi)$ датчика с хлористым литием в поливинилацетате для различных температур в пределах от —40 до +40 °С. Одним из достоинств электролитических ЭГД является возможность использования их при низких температурах до точки замерзания используемого раствора.

У многих типов датчиков, например полиэлектролитических, температурная зависимость аналогична зависи-

мости, характерной для полупроводниковых материалов;

$$R_t = R_0 e^{-\alpha \Delta t},$$

где R_0, R_t — сопротивление ЭГД при температурах: начальной (t_0) и $t = t_0 + \Delta t$; α — температурный коэффициент сопротивления.

Величина α колеблется в широких пределах (0,05—0,5% φ на 1 °С) в зависимости от типа датчика и температуры; при температурах ниже 0 °С коэффициент α сильно увеличивается.

Кроме того, при отрицательных температурах возникают затруднения, связанные с измерением больших сопротивлений, а иногда и уменьшением чувствительности ЭГД. Для устранения этих недостатков предлагалось проводить измерения с подогревом исследуемого воздуха. При условии стабилизации температуры воздуха создается возможность прямого измерения температуры точки росы или влагосодержания воздуха электролитическими ЭГД. Электролитические датчики, у которых чувствительный элемент содержит раствор солей или кислот, плохо переносят температуру выше 50—60 °С; у ЭГД с LiCl даже хранение при таких температурах может вызвать изменение характеристик. Зависимость выходной величины электролитических ЭГД от атмосферного давления связана с принципом действия этих датчиков. Влияние давления газа на основную характеристику $R(\varphi)$ хлористолитиевых датчиков показано на рис. 8-3,*б*.

При измерениях влажности приземного слоя атмосферы в обычных условиях влиянием атмосферного давления можно пренебречь, но его необходимо принимать во внимание при измерениях в разреженных или сжатых газах.

Неустранимые погрешности измерения могут быть вызваны гистерезисом характеристик датчика, загрязнениями исследуемой среды и поляризацией электродов.

Исследования влияния различных газовых примесей в воздухе на характеристики хлористолитиевых ЭГД показали, что аммиак и двуокись серы существенно влияют на градуировку датчика.

Электрохимические процессы, связанные с поляризацией электродов, усиливаются с ростом влажности и температуры. Для уменьшения их влияния сопротивление электролитических датчиков всегда измеряют при пере-

менном токе и низкой плотности тока через электроды. Ослаблению эффекта поляризации способствуют также некоторые добавки к электролиту (например, поливинилацетата к LiCl) и электроды из благородных металлов (платина, золото, палладий). У ЭГД с LiCl их предлагали заменять хлоро-серебряными, получаемыми электролитическим покрытием серебряных проволочек хлористым серебром; опыт показал, что этот способ недостаточен для обеспечения долговременной устойчивости характеристик ЭГД.

Динамические характеристики электролитических ЭГД определяются параметрами влагочувствительного элемента, а также внешними факторами (параметрами объекта измерения).

К первой группе факторов относятся размеры влагочувствительного слоя, особенно его толщина, природа электролита и его концентрация. Минимизация массы влагочувствительного элемента, осуществленная в описанных выше миниатюрных и тонкопленочных датчиках, позволяет получить высокое быстродействие электролитических ЭГД. При нанесении в вакууме влагочувствительной пленки, толщиной не выше 0,1 *мкм*, процессы влагообмена носят чисто адсорбционный характер и постоянная времени T датчика не превышает 1—3 *сек*.

Из числа параметров исследуемого газа на инерционность ЭГД сильно влияет температура. У хлористолитиевых и некоторых других датчиков установлено значительное увеличение постоянной времени при низких отрицательных температурах.

Скорость газового потока оказывает такое же влияние, как у других гигрометров, — быстродействие их растет с ростом скорости газа. Этим обусловлено значение расположения плоскости чувствительного элемента относительно направления потока (при перпендикулярном расположении инерция меньше, чем при параллельном) и конструкции защитного чехла ЭГД.

Наконец, величина T зависит от начального (равновесного) значения относительной влажности φ_0, от величины и знака ее изменения. Влияние φ_0 и скорости газа v на постоянную времени T иллюстрирует рис. 8-4 [Л. 8-8]; постоянная времени увеличивается с ростом измеряемой влажности. Возрастание абсолютной величины приращения влажности $\Delta\varphi$ также влечет за собой увеличение постоянной времени T; что же касается влияния знака $\Delta\varphi$,

то постоянная времени значительно больше (иногда в несколько раз) при понижении влажности, чем при ее повышении. В общем влияние величин v, $\Delta\varphi$ имеет такой же характер, как у других чувствительных элементов, действие которых основано на процессах сорбции.

Рассматриваемые ЭГД можно аппроксимировать апериодическим (инерционным) звеном первого порядка с передаточной функцией относительно влажности:

$$W_{\varphi}(p) = \frac{k}{pT+1}, \qquad (8\text{-}5)$$

где k — статический передаточный коэффициент.

Необходимыми условиями для применения функции (8-5) являются малость отклонений $\Delta\varphi$ входной величи-

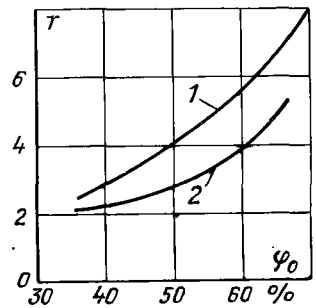


Рис. 8-4. Зависимость постоянной времени электролитического датчика от начальной относительной влажности при разных скоростях воздуха.
1 — v=1,2 м/сек; 2 — v=1,7 м/сек.

ны и стабилизация всех других влияющих величин. Если рассматривать большие отклонения $\Delta\varphi$, нельзя пренебречь нелинейностью звена, а также переменными значениями коэффициентов его уравнения в зависимости от значения входной величины (рабочей точки статической характеристики).

Выше рассматривалась только «влажностная» инерционность ЭГД. В практических условиях нередко (например, при работе радиозонда) датчик подвергается одновременным изменениям влажности и температуры газа. Представляют, следовательно, интерес его динамические свойства также относительно температуры, рассматриваемой как входное воздействие при стабилизации остальных воздействий. Температурные динамические характеристики ЭГД, однако, мало изучены и по ним отсутствуют надежные экспериментальные данные. Можно предположить, что они описываются передаточной функцией $W_t(p)$, аналогичной $W_{\varphi}(p)$) [формула

(8-5)]. Некоторые параметры (например, масса чувствительного элемента) оказывают одинаковое влияние на обе передаточные функции, другие специфичны для каждой из них. Так, например, на температурную постоянную времени T_t сильно влияет материал каркаса датчика; для уменьшения T_t в одном из датчиков Данмора влагочувствительная пленка наносилась на тонкостенную алюминиевую трубку.

Как уже указывалось, в измерительных устройствах гигрометров с электролитическими датчиками используется переменный ток промышленной и иногда низкой звуковой частоты. Если сопротивление датчика R_x изменяется в сравнительно узких пределах (2—3 порядка), применяются омметры или мосты переменного тока различных типов, в том числе с автоматическим уравновешиванием. Для измерения величин R_x, изменяющихся в широких пределах, требуются более сложные схемы, например логарифмические, позволяющие получить линейную градуировку в процентах относительной влажности. В радиозондах применяются схемы с преобразованием величины R_x в низкую звуковую частоту.

Важнейшим с практической точки зрения параметром ЭГД является степень устойчивости их характеристик. Испытания и опыт эксплуатации электролитических ЭГД в различных условиях показали наличие необратимых процессов старения. Кратковременная (в течение 10—15 дней) и долговременная неустойчивость характеристик вызваны физическими и химическими воздействиями на электроды и влагочувствительную пленку; механизм этих процессов еще полностью не изучен. К химическим процессам можно отнести взаимодействие влагочувствительного элемента с компонентами газа, гидратацию и другие необратимые изменения пленки под воздействием влаги и электрического тока, коррозию электродов. К физическим воздействиям относятся механические повреждения пленки, ухудшение ее адгезии к подложке, загрязнение механическими примесями. Экспериментальное исследование старения хлористолитиевых датчиков показало, что основной причиной неустойчивости является воздействие повышенной влажности ($\varphi > 90 \div 95\%$). От этого недостатка свободны ЭГД некоторых типов, например с пленкой из смеси сегнетовой и поваренной солей, а также тонкопленочные. У датчиков с пленкой BaF_2 кратковременное пребывание в среде с относительной

влажностью $\varphi=100\%$ и длительное с $\varphi=97\%$ не оказывало влияния на характеристики датчика. У полосковых ЭГД существенное улучшение кратковременной устойчивости достигалось использованием в качестве связующего смеси поливинилового спирта с желатином при изготовлении основания из оргстекла. Для повышения устойчивости характеристик предлагались также различные режимы искусственного старения, хранение хлористолитиевых ЭГД в атмосфере с влажностью, близкой к нулю (например, в контейнерах с силикагелем), а также специальные рецептуры влагочувствительной пленки и методики изготовления ЭГД. В целом, однако, задача предотвращения старения электролитических ЭГД не решена до настоящего времени. Хотя у некоторых датчиков характеристики не меняются в течение нескольких месяцев и даже лет, нет уверенности в устойчивости характеристик всех типов и даже всех экземпляров одного типа ЭГД. Нередко предприятия-изготовители ЭГД рекомендуют периодически (через 2—3 мес.) проверять градуировку и в случае необходимости корректировать ее. Это, разумеется, препятствует широкому производственному использованию подобных ЭГД.

8-2. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СОРБЦИОННЫЕ ДАТЧИКИ

Сорбционные ЭГД можно разделить на адсорбционные и абсорбционные. В первых используется явление адсорбции влаги внешней поверхностью материала в виде тонкого слоя, а объектом измерения являются электрические характеристики этой поверхности (например, поверхностное сопротивление), обусловленные наличием на ней водной пленки с ионами водорастворимых веществ. В ЭГД второй группы чувствительный элемент представляет собой тонкий слой влагочувствительного материала на водостойкой подложке или определенный объем капиллярнопористого материала. Механизм действия датчиков второй группы аналогичен: водяной пар, содержащийся в газе, поглощается капиллярами всего объема чувствительного элемента и изменяет его объемные электрические характеристики. Приведенное подразделение сорбционных ЭГД на две группы несколько условно. Образование на поверхности водной пленки у некоторых материалов сопровождается увлажнением примыкающих к поверхности слоев материала, электри-

ческие характеристики которых также влияют на результат измерения.

Статическая характеристика абсорбционных ЭГД — зависимость выходной электрической величины от значения измеряемой влажности газа — определяется двумя функциями:

а) зависимостью влагосодержания материала чувствительного элемента от влажности воздуха, т. е. изотермами сорбции и десорбции материала этого элемента;

б) зависимостью измеряемой электрической величины (сопротивления в цепи постоянного или переменного тока, емкости, тангенса угла диэлектрических потерь и т. п.) от влагосодержания чувствительного элемента; характер этой зависимости был рассмотрен в первой части книги.

Равновесная влажность материала является его индивидуальной характеристикой; поэтому статическая характеристика, даже у ЭГД одного типа, имеющих влагочувствительные элементы из различных материалов, не совпадает. Ее можно вычислить, если известны указанные выше две функции, но на практике ЭГД градуируют эмпирически.

Как уже отмечалось выше, поверхностное сопротивление измеряется, строго говоря, только у тех ЭГД, у которых тонкая водная пленка образуется на гладкой поверхности водостойкого непористого диэлектрика (стекла, кварца, некоторых видов обожженной керамики и т. д.). Достоинствами таких ЭГД являются резкие изменения поверхностного сопротивления с влажностью и малая инерция; поверхностное сопротивление можно измерять при постоянном токе. Однако это сопротивление зависит от состояния поверхности диэлектрика и очень чувствительно ко всякого рода загрязнениям поверхности и наличию в воздухе паров аммиака, спирта, ацетона и других полярных жидкостей.

По указанным причинам ЭГД чисто адсорбционного типа не нашли широкого применения. Подложкой датчиков вначале служили преимущественно стекла различных сортов; иногда их предварительно подвергали обработке — термической или другой. В современных ЭГД предпочтение отдают кварцу, чаще плавленому. На поверхность кварцевой пластины напыляют электроды из благородных металлов, например, гребенкообразной формы.

Значительно больше распространены ЭГД с пористым диэлектриком, у которых основным процессом является адсорбция влаги на внутренней поверхности пор. Датчики этого типа более инерционны, чем чисто адсорбционные, но обладают более устойчивыми характеристиками. Известно большое количество ЭГД этого типа, имеющих в качестве влагочувствительного элемента тонкие слои разнообразных пористых материалов; рассмотрим некоторые примеры. Датчики, разработанные ВНИКИ «Цветметавтоматика» [Л. 8-9], имеют чувствительный элемент в виде пластины из микропористого эбонита (пористость около 58% при диаметре пор до 0,5 *мкм*) толщиной 0,3 *мм*; на поверхность пластины напылением нанесены электроды. Серийно выпускаемый гигрометр с датчиком этого типа, термостатированным при температуре 40±2 °С, предназначен для измерения абсолютной влажности в пределах 1—10 *г/м*^{3}.

Стабильность характеристики датчика обеспечивается тем, что измерения производятся на постоянном токе при плотности тока, не превышающей 10^{-9} *а/см*^{2}.

Для увеличения чувствительности датчика при измерении низких значений абсолютной влажности (0,1—0,8 *г/см*^{3}) чувствительный элемент пропитывали водным раствором хлористого лития. Проводимость пропитанного датчика определяется не только проводимостью пленки воды, адсорбированной поверхностью пор, но и электролитической проводимостью раствора LiCl, заполняющего поры; такой датчик является сорбционно-электролитическим. Однако долговременная стабильность характеристики такого датчика оказалась недостаточно удовлетворительной.

Другие сорбционные ЭГД имеют в качестве чувствительного элемента диск из бутирата ацетилцеллюлозы или других эфиров целлюлозы, толщина которого не превышает одного или нескольких десятков микрометров. Электродами служат влагопроницаемые слои графита, нанесенные на обе поверхности диска.

В другом варианте электроды представляют собой слои пористого диэлектрика, содержащие матрицу тонко диспергированных частиц графита. Выходной величиной датчика является электрическая емкость. В качестве влагочувствительного материала нередко используют твердые сорбенты. В датчиках конструкции автора [Л. 0-1] основанием служил цилиндр из органического стекла, на

поверхность которого наносится слой мелко измельчённого (величина частиц 30—50 *мкм*) силикагеля. Недостатком этих датчиков является большая величина сопротивления (измеряемого на постоянном токе) при относительной влажности воздуха ниже 40—50%. Другие ЭГД имели чувствительный элемент в виде диска из прессованного цеолита, предварительно измельченного до порошкообразного состояния. Цеолиты наносились также в виде тонких слоев на водостойкие основания.

В абсорбционных ЭГД используется не тонкий слой, а определенный объем гигроскопического материала. Большинство капиллярнопористых материалов очень легко поглощает влагу, но лишь немногие из них так же легко отдают ее и свободны от сорбционного гистерезиса. Заполнение капилляров водяным паром вызывает резкое уменьшение объемного сопротивления; в то же время наличие разветвленных капилляров увеличивает инерционность ЭГД этого типа. Кроме того, им присущи также гистерезис и нестабильность характеристик. Несмотря на эти недостатки, был создан ряд датчиков этого типа с использованием разных твердых материалов или отдельных волокон и тканей из волокон. Чувствительным элементом являлись, например, стеклянное волокно или нейлоновая ткань, зажатые между двумя перфорированными металлическими пластинами, а также искусственное волокно с вплетенными в ткань серебряными нитями, выполняющими роль электродов. Более широкое применение нашли пористые керамические материалы, например смеси с окисью церия и двуокисью титана. Достоинство этих датчиков — способность переносить длительное воздействие газов с относительной влажностью, равной 100%.

Наибольшее практическое значение имеют сорбционные датчики следующих типов: угольные, пьезокварцевые и алюминиевооксидные.

Угольные ЭГД имеют влагочувствительный элемент в виде пленки гигроскопического связующего вещества, содержащего в виде суспензии тонко размолотые частицы угля. Чаще всего связующим служит целлюлоза или ее соединение (например, гидроксилэтилцеллюлоза или ацетилцеллюлоза) с добавками желатина, а иногда и других веществ. Технология изготовления датчиков описана в [Л. 8-10]. Уголь часто вводится в связующее в виде сажи (ацетиленовой). Влагочувствительная плен-

ка наносится методом погружения (реже набрызгивания) на основание — прямоугольную пластину из твердого диэлектрика (оргстекла или полистирола). Боковые длинные грани пластины покрывают металлом, например серебром; эти металлические слои служат электродами. Значительно реже применяют основания цилиндрической формы и проволочные спиральные электроды.

Выходной величиной угольного датчика служит его электрическое сопротивление. Согласно общепринятой теории проводимость пленки изменяется в результате ее сжатия или расширения под влиянием сорбированной влаги. Деформация пленки вызывает перемещение проводящих частиц угля. Некоторые исследователи [Л. 8-10] подвергают сомнению деформационный механизм действия датчика и считают его чисто сорбционным, обусловленным целлюлозными составляющими пленки.

Однако зависимость $R_x(\varphi)$ — сопротивления угольного датчика от относительной влажности воздуха имеет характер, противоположный наблюдаемому не только у электролитических, но и других сорбционных ЭГД. При постоянной температуре сопротивление датчика увеличивается с ростом влажности, что может свидетельствовать о преобладании электронной проводимости над ионной. Для угольных датчиков характерно явление гистерезиса; наличие гистерезисной петли шириной до 10% для диапазона относительной влажности $10 \leqslant \varphi \leqslant 100\%$ было установлено у датчиков, разработанных в СССР [Л. 8-11]. Сопротивление R_x при $\varphi = \text{const}$ увеличивается с повышением температуры, причем температурный коэфициент непостоянен.

Форма переходной характеристики угольного датчика несколько отличается от простой экспоненциальной; в частности, ей свойственно более быстрое нарастание выходной величины на начальном участке. Следовательно, датчик следует рассматривать как инерционное звено, порядок которого выше первого. На практике инерционность датчика характеризуют одной постоянной времени T. Быстродействие угольных ЭГД достаточно высоко. Так, например, упомянутые отечественные датчики имели при 0 °С и неподвижном воздуха $T = 2$ *сек* при увеличении влажности и $T = 6$ *сек* при ее уменьшении. Как и у других ЭГД, постоянная времени уменьшается с ростом скорости воздуха, увеличивается при понизе-

нии температуры и, в меньшей степени, при повышении влажности.

Угольные датчики выпускаются рядом приборостроительных фирм и нашли применение преимущественно в радиозондах; благодаря высокому быстродействию и отсутствию отказов при насыщении атмосферы влагой они стали основными конкурентами хлористолитиевых ЭГД в этой области. Их широкому применению в промышленности препятствует, кроме значительного сорбционного гистерезиса, нестабильность характеристик.

Пьезокварцевые сорбционные датчики основаны на изменении параметров (амплитуда и частота колебаний) кварцевого резонатора в результате адсорбции влаги на его поверхности или сорбции влаги гигроскопической пленкой, нанесенной на поверхность кварца. Выходной величиной влагочувствительных элементов обоих типов в большинстве случаев служит собственная частота колебаний пьезокварца, уменьшающаяся с ростом измеряемой влажности.

Первоначально разрабатывались чисто адсорбционные пьезокварцевые датчики, т. е. без гигроскопической пленки. Их принцип действия основан на прямом изменении эквивалентного сопротивления кварцевого резонатора в результате адсорбции водяных паров и обусловленного ею затухания упругих колебаний в поверхностном слое кварца и его металлизированном покрытии. Один из первых гигрометров с таким датчиком имел простую схему, состоящую из двух ламповых генераторов, собранных на двух половинах двойного триода. В [Л. 8-12] исследованы влияние влажности воздуха на составляющие эквивалентного сопротивления кварцевого резонатора и зависимость его характеристик от температуры и давления газа.

Значительно большее распространение нашли пьезокварцевые датчики с тонким слоем влагосорбирующего вещества, наносимого на металлизированную поверхность кварца. Такой датчик представляет собой сочетание влагочувствительного элемента сорбционного типа с пьезокварцевым преобразователем, измеряющим сорбированную массу влаги. В датчиках этого типа ценой некоторого увеличения инерционности достигают высокой чувствительности и понижения нижнего предела измерений в область микровлагосодержаний. Влагочувствительный слой изготовляют из материалов с микропористой

структурой, используемых в электрических сорбционных датчиках других типов, — молекулярных сит типа цеолитов, пленок двуокисей кремния, пятиокиси фосфора, сульфированного полистирола и других гигроскопических полимеров и природных смол. Влагочувствительный материал должен иметь минимальный сорбционный гистерезис и обладать устойчивостью характеристик во времени. Последнее требование не выполняют некоторые фтористые соединения, например NaF, LiF. Полярные жидкости типа полиэтиленгликоля обеспечивают малую инерционность, но неудовлетворительны по устойчивости и избирательности к водяному пару [Л. 8-13]. В последнее время предлагалось применение в качестве сорбента водорастворимых солей ($CaCl_2$, LiBr, LiCl) с добавкой в качестве связующего поливинилового спирта или полимерных пленок.

Статическую характеристику датчика можно приближенно описать уравнением

$$\Delta f = -\frac{f^2}{N\rho_k}\frac{\Delta m}{S}, \qquad (8\text{-}6)$$

где Δf — изменение частоты резонатора, соответствующее изменению Δm массы сорбата (влаги); ρ_k, S — соответственно плотность и площадь поверхностного слоя кварцевой пластины; N — частотный коэффициент, зависящий от типа среза и формы пьезопластины.

Чувствительность датчика можно считать постоянной величиной лишь для тонких пленок (толщиной до 30 — 50 *нм*). У выполненных приборов она составляла 200 — 400 *гц/мкг* влаги. Максимальная допустимая загрузка кварца пленкой уменьшается с ростом частоты, но одновременно значительно повышается его чувствительность. Верхний предел частоты ограничен величиной 15 *Мгц* из соображений механической прочности. Чаще всего рабочая частота гигрометров с пьезокварцевыми датчиками составляет 8—9 *Мгц*. В [Л. 8-14] рекомендуется использовать пьезопластины с моночастотной характеристикой. Для такой пластины с пленкой SiO_2 определенной пористой структуры при $f = 8{,}19$ *Мгц* выведена зависимость Δf от относительной влажности φ воздуха:

$$\Delta f = 28\xi\varphi^{T/600},$$

где ξ — отношение толщины пленки к предельно допустимой, вызывающей потерю работоспособности резонатора; T — температура воздуха.

Пьезокварцевые датчики с влагочувствительной пленкой имеют очень широкие пределы измерений — от 0,1 до 30 000 м. д., причем верхний предел соответствует $\varphi = 100\%$. С увеличением диаметра пор влагочувствительного покрытия верхний предел повышается, но одновременно уменьшается чувствительность датчика.

Количество влаги, сорбированной пленкой, определяется ее сорбционными изотермами; это предопределяет влияние температуры и давления исследуемого газа на результат измерения влажности. Минимальное значение ТКЧ (температурного коэффициента частоты) в интервале температур $-40 \div +80$ °С имеют кварцевые пластины среза АТ.

Эмпирическое выражение для температурной погрешности δ_φ датчиков с пленкой SiO_2 при измерениях относительной влажности φ воздуха имеет вид [Л. 8-14]:

$$\delta_\varphi = \varphi(\varphi^{\Delta T/T} - 1),$$

где ΔT — разность температур градуировки и измерения.

Измерительные устройства гигрометров используют частотную модуляцию с помощью пьезокварцевого датчика, включенного в колебательный контур генератора, и рассчитаны на автоматическое непрерывное измерение. Для компенсации погрешностей — температурных и от наличия газовых примесей — они строятся на принципе сравнения, реализуемом двумя различными способами.

В первом (рис. 8-5,*а*) применяются два кварцевых резонатора, имеющих одинаковые ТКЧ. Один из них — измерительный — обтекается потоком анализируемого газа; второй (без влагочувствительного покрытия) — опорный — герметизирован. Кварцевые резонаторы управляют частотой колебаний двух ламповых или полупроводниковых генераторов — измерительного и опорного. Частоты обоих генераторов сравниваются в смесителе; частота биений Δf характеризует влагосодержание газа. Для настройки нуля гигрометра через измерительный резонатор пропускают абсолютно сухой газ.

Вторая, более сложная схема (рис. 8-5,*б*) имеет два одинаковых пьезокварцевых датчика; в один из них поступает поток анализируемого газа, а во второй — образцового (полностью осушенного). Переключающее устройство периодически изменяет направления обоих потоков газа.

Гигрометры с пьезодатчиками с чувствительной пленкой имеют удобную для измерения естественную выходную величину, широкие пределы измерений, малую инерционность, достаточную чувствительность, в том числе и в области малых и микровлагосодержаний, они применимы для воздуха и различных газов. К их недостаткам относятся чувствительность к изменениям плотности и вязкости исследуемого газа, а также поглощение некоторых компонентов газа, кроме водяного па-

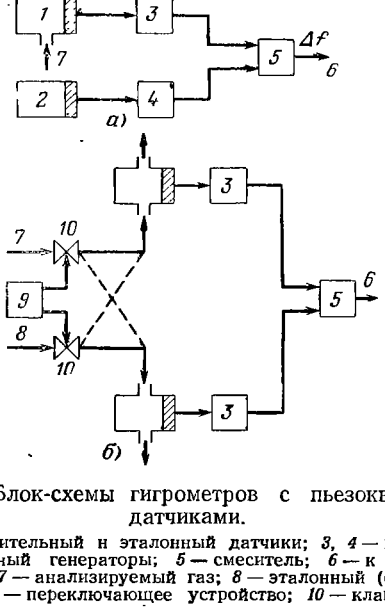


Рис. 8-5. Блок-схемы гигрометров с пьезокварцевыми датчиками.

1, 2 — измерительный и эталонный датчики; *3, 4* — измерительный и опорный генераторы; *5* — смеситель; *6* — к выходному устройству; *7* — анализируемый газ; *8* — эталонный (осушенный) газ; *9* — переключающее устройство; *10* — клапаны.

ра. Ошибка может достичь ощутимой величины, если эталоном служит осушенный азот, а исследуемая газовая смесь имеет влагосодержание, близкое к нулю, и содержит примеси двуокиси углерода, хлористого водорода, метилового спирта и т. д.

Погрешности вызываются также осаждением пыли и других механических загрязнений газа на поверхности пленки, а в случае применения полимерных пленок — их старением.

Алюминиево-оксидные ЭГД, предложенные английскими исследователями [Л. 8-15], имеют в качест-

ве влагочувствительного элемента пленку окиси алюминия, полученную на поверхности чистого алюминия электролитическим путем — анодированием в растворе серной кислоты (реже щавелевой или хромовой). Выбор режима анодирования (температура раствора и концентрация кислоты в нем, плотность тока и длительность анодирования) позволяет получить нужные параметры оксидной пленки — толщину и пористость. Различные режимы и методики анодирования, применяемые на практике, приведены в [Л. 8-15—8-18].

Оксидный слой, образованный на алюминиевой подложке, можно рассматривать как двухслойную пористую структуру, состоящую из: а) внешнего слоя с высокой пористостью, обеспечивающей адсорбцию паров на поверхности стенок пор; б) прилегающего к подложке тонкого, непористого и более плотного («барьерного») слоя. По данным [Л. 8-16], толщину барьерного слоя можно изменять «вторым анодированием» в растворе борнокислого аммония при повышенном напряжении.

Алюминиевая подложка является одним из электродов датчика. Вторым электродом служит тонкий (проницаемый для водяных паров) слой проводящего вещества, нанесенный на внешнюю поверхность оксидного покрытия. Вначале применялся графит, в последующем — слой металла (чаще всего золота, реже серебра, алюминия, палладия или платины), нанесенный на часть поверхности окиси алюминия испарением в вакууме. Основные требования к внешнему электроду — хорошая адгезия, максимальная влагопроницаемость и минимальное электрическое сопротивление.

Известны две конструктивные модификации ЭГД рассматриваемого типа. У «стержневых» датчиков подложкой для влагочувствительной пленки служит цилиндрический алюминиевый стержень (чаще всего отрезок прутка или проволоки). Плоские датчики имеют основание из тонкого листового алюминия (иногда алюминиевой фольги). Форма основания — прямоугольная, реже круглая, а форму внешнего электрода и его расположение задают с помощью металлического трафарета. Вывод к внешнему электроду целесообразно прикреплять в той части основания, где отсутствует влагочувствительное покрытие. Отметим еще предложение [Л. 8-19] изготовлять датчик из двух скрученных или сплетенных алюминиевых проволочек малого диаметра

(0,3—0,4 *мм*), покрытых слоем окиси; проволочки выполняют роль электродов. При этом отпадает необходимость нанесения внешнего электрода, что существенно упрощает изготовление датчика. Сведения о практическом применении такой конструкции отсутствуют.

Характеристики алюминиевооксидных ЭГД определяются главным образом свойствами оксидной пленки. Идеализированная модель этой пленки (рис. 8-6,*а*) основана на предетавлении пористого слоя в виде совокупности плотно упакованных элементарных ячеек, каждая из которых имеет вертикальную пору, доходящую

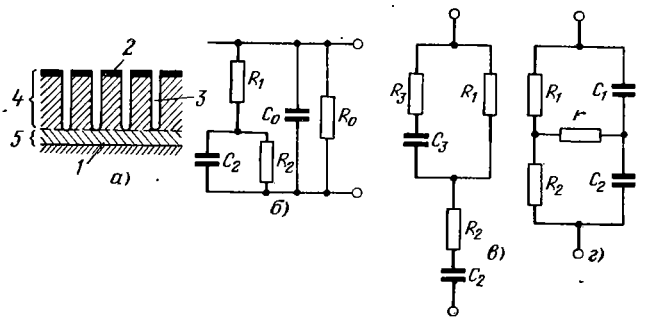


Рис. 8-6. Оксидная пленка ЭГД.

а — модель структуры; *б*, *в*, *г* — схемы замещения; *1* — алюминиевая подложка; *2* — внешний электрод; *3* — пора; *4* — пористый слой; *5* — барьерный слой.

до тонкого барьерного слоя. Такую модель можно описать различными электрическими схемами замещения в цепи переменного тока. По схеме, представленной на рис. 8-6,*б* [Л. 8-15], C_0 и R_0 — емкость и сопротивление всей пленки между электродами; R_1 — поверхностное сопротивление стенок капилляров; R_2, C_2 — параметры барьерного слоя.

В схеме замещения (рис. 8-6,*в*) [Л. 8-16] нижняя цепь соответствует барьерному слою (R_2, C_2), правая ветвь верхней цепи — поре (R_1), а левая ветвь (R_3, C_3) — материалу пористого слоя.

Наконец, в схеме (рис. 8-6,*г*) пористый слой (R_1, C_1) и барьерный (R_2, C_2) соединены переходным сопротивлением r.

Из всех схем замещения следует, что: а) полное сопротивление датчика имеет активную и емкостную со-

ставляющие — выходной величиной может служить полное сопротивление или любая из его составляющих; б) электрические параметры датчика определяются параметрами как пористого, так и барьерного слоев.

Если считать пористый слой источником полезного сигнала, а барьерный — источником помех, логическим следствием является предложение [Л. 8-20] уже в процессе изготовления датчика уничтожать барьерный слой путем соответствующей обработки подложки с примыкающим к ней плотным слоем (амальгамирование или растворение в кислотах).

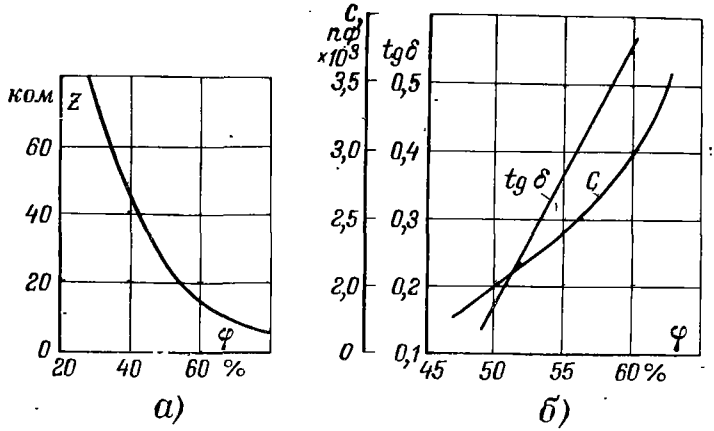


Рис. 8-7. Зависимость электрических свойств ЭГД с окисью алюминия от влажности воздуха.

Однако во всех применяемых датчиках барьерный слой сохраняется. Его влияние на параметры датчика зависит от степени увлажнения пленки. Так, при низкой влажности значение R_1 (рис. 8-6,*б*) очень велико и шунтирующее влияние C_2 на C_0 незначительно, а при высокой влажности значение R_1 сильно уменьшается и роль C_2 возрастает.

Влажностные характеристики датчиков получают экспериментальным путем при постоянной температуре. На рис. 8-7 приведены снятые при $t=20$ °С влажностные характеристики датчика, изготовленного автором, — зависимость от относительной влажности воздуха полного сопротивления при частоте $f=50$ *гц* (рис. 8-7,*а*), емкости и тангенса угла диэлектрических потерь при $f=1\,000$ *гц*

(рис. 8-7,*б*). На форму характеристик (т. е. на чувствительность датчика, пределы измерений и другие свойства) можно воздействовать выбором тех параметров методики изготовления, которые определяют размеры и свойства оксидной пленки, а также параметров измерительного устройства. Важное значение имеет толщина пористого слоя пленки: с ее увеличением минимальное измеряемое значение влажности φ перемещается в сторону высоких φ и увеличивается чувствительность датчика в этой области. Полная проводимость плоского датчика зависит от напряжения «второго анодирования» [Л. 8-16] при $\varphi > 40\%$; уменьшению этого напряжения (в пределах 50—300 *в*) соответствует увеличение абсолютного значения проводимости и чувствительности датчика. Зависимость $\operatorname{tg}\delta$ от частоты (в пределах $f = 30 \div 10^6$ *гц*), исследованная для плоского датчика, показала, что при $\varphi = 0$ $\operatorname{tg}\delta \approx 0{,}005 \div 0{,}008$ и почти не зависит от f. С увеличением φ возрастают значения $\operatorname{tg}\delta$ и частотные характеристики $\operatorname{tg}\delta(f)$ при $\varphi = \text{const}$ имеют четко выраженный максимум, который с ростом φ закономерно сдвигается в сторону высоких φ.

Обычные оксидные датчики позволяют измерять относительную влажность в пределах $20 \div 30 < \varphi < 100\%$. Для смещения нижнего предела в область малых и микровлагосодержаний и повышения чувствительности в этой области было предложено [Л. 8-21] заполнять поры оксидной пленки насыщенным водным раствором гигроскопической соли до нанесения на пленку внешнего электрода. Раствором заполняется только часть объема пор без образования сквозных проводящих мостиков между электродами. Раствор LiCl позволяет измерять температуры точки росы τ от —120 до —20 °С, раствор $CaCl_2$ от —70 до 0 °С. На базе таких датчиков выпускают гигрометры для измерения микроконцентраций влаги, начиная с долей $1 \cdot 10^{-6}$, не только в газах, но и в жидкостях. Недостаток этих ЭГД — высокая чувствительность к перегрузкам по влажности, приводящая к выходу чувствительного элемента из строя при контакте с атмосферным воздухом больше 5—10 *сек*. Указанная особенность вынуждает хранить датчики в закрытых контейнерах с молекулярными ситами ($\tau \approx$ $\approx$ —100 °С). Относительно дополнительных погрешностей оксидных ЭГД имеются противоречивые данные. Экспериментальные данные, полученные для стержне-

вых датчиков в диапазоне температур —15÷80 °С [Л. 8-15] и для плоских датчиков при температурах от комнатных до —90 °С, свидетельствуют о том, что температурная погрешность близка к нулю; гистерезис отсутствует, если датчики не находились длительное время в воздухе, насыщенном водяным паром.

Другие исследователи [Л. 8-16 и 8-18] отмечают довольно большие температурные погрешности и гистерезисные явления.

Инерционность датчика определяется процессами диффузии водяного пара через слой газа к поверхности пленки и главным образом (в движущемся газе) диффузии и адсорбции внутри влагочувствительного слоя. Рассматриваемые ЭГД можно аппроксимировать апериодическим звеном первого порядка. Постоянная времени T при понижении влажности больше, чем при повышении; ее величина зависит также от начальной влажности и увеличивается при понижении температуры. У датчиков обычной конструкции T в среднем исчисляется несколькими секундами, иногда десятью и больше.

Доказана возможность миниатюризации оксидных ЭГД со значительным повышением их быстродействия. Для этого необходимо предельно уменьшить толщину влагочувствительной пленки, а также исключить соприкосновение с ней гигроскопических материалов. Миниатюрный датчик для радиозондов весом не более 12 *мг* (основание из алюминиевой фольги толщиной около 0,08 *мм* со слоем окиси толщиной около 2 *мкм*) имел постоянную времени (для температуры 24 °С) около 0,1 *сек* при повышении относительной влажности с 0 до 50% и около 0,3 *сек* при понижении со 100 до 50% [Л. 8-17]. Еще большим быстродействием ($T \approx 0{,}025$ *сек*) обладает микродатчик для динамических измерений градиентов и полей влажности вблизи поверхности влажных тел [Л. 8-22].

Основным недостатком алюминиевооксидных ЭГД является их старение. Постепенное изменение характеристик наблюдалось у оксидных датчиков в самых различных условиях хранения и эксплуатации. Иногда по истечении длительного времени (несколько месяцев) характеристики стабилизировались, но в большинстве случаев уменьшение чувствительности датчиков во времени не прекращалось полностью. Для предотвращения старения применялись различные способы — искусствен-

ное старение, термообработка пленки и т. д. Было высказано предположение, что причиной старения является медленное уменьшение проводимости стенок и оснований пор в результате процесса диффузии легких анионов, образованных в процессе анодирования, со стенок капилляров в кристаллическую структуру окиси. Для замены этих анионов более тяжелыми, предлагалось погружать датчики на 1—2 *сек* в насыщенный раствор некоторых солей, например вольфрамовокислого натрия, а затем подвергать искусственному старению периодическим изменением относительной влажности окружающего воздуха [Л. 8-15]. Все эти способы в лучшем случае позволяют замедлить процесс старения и стабилизировать характеристики на несколько недель или месяцев.

В гигрометрах с оксидными ЭГД применялись схемы измерения емкости или полной проводимости, построенные на различных принципах. Простейшей является последовательная схема омметра на частоте 50 *гц* (см. рис. 4-3,*а*). Другим устройством, работающим на той же частоте, является баллистический преобразователь емкости в силу тока по принципу накопления количества электричества в конденсаторе. В современных схемах этого типа вместо электромеханических переключателей или реле применяют бесконтактные переключающие устройства. Для измерения полного сопротивления датчика применялись также мосты низких звуковых частот ($f \leqslant 2 \div 3$ *кгц*) и резонансные схемы на радиочастотах на принципе биений или генераторы с частотой, модулируемой датчиком и измеряемой частотным детектором; эти схемы аналогичны применяемым в диэлькометрических влагомерах (см. § 4-2).

Алюминиевооксидные ЭГД представляют большой интерес для многих областей науки и техники благодаря своим достоинствам: низкая стоимость, механическая прочность, простота изготовления, возможность получения взаимозаменяемых датчиков и их миниатюризации, малоинерционность, возможность измерений микровлагосодержаний газов и жидкостей и измерений при отрицательных температурах.

Препятствием к широкому практическому применению этих датчиков является лишь то, что до сих пор не решена полностью задача долговременной стабилизации их характеристик.

Кроме окиси алюминия, в сорбционных ЭГД использовались окиси и других металлов, имеющие развитую пористую поверхность, например пленки двуокиси олова, наносимые испарением в вакууме на фарфоровый стержень. У другого ЭГД, основанного на технике изготовления термисторов, влагочувствительный элемент содержит окись кобальта [Л. 8-23]. Достоинством последних двух датчиков является возможность работы при температурах выше 100 °С.

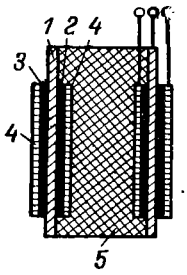


Рис. 8-8. Гигротермодатчик.

Для ЭГД с оксидным слоем автором разработан способ температурной компенсации. Схема гидротермодатчика, построенного с использованием этого способа, показана на рис. 8-8. На внутренней и внешней цилиндрических поверхностях тонкостенной алюминиевой трубки *1* имеются оксидные слои *2* и *3*; поверх этих слоев нанесены проводящие графитовые слои (электроды) *4*. Внутренняя полость трубки *1* заполнена влагоизолирующим лаком *5*, вследствие чего влагочувствительный слой *3* находится в гигротермическом, а слой *2* только в термическом равновесии с окружающей средой. Такой «совмещенный гигротермодатчик» позволяет одновременно измерять влажность и температуру среды. На этом принципе можно осуществлять температурную компенсацию ЭГД различных типов и конструкций.

8-3. ГИГРОМЕТРЫ С КУЛОНОМЕТРИЧЕСКИМИ ДАТЧИКАМИ

Принцип действия кулонометрических гигрометров, предложенных Кейделем в 1956 г., основан на непрерывном поглощении влаги пленкой гигроскопического вещества и одновременном электролитическом разложении поглощенной влаги. Материал, из которого изготовлен чувствительный элемент, должен являться высокоэффективным сорбентом, иметь высокое удельное сопротивление в сухом виде и высокую проводимость после адсорбции влаги, обладать хорошими адгезионными свойствами и механической прочностью, а также не подвергаться разложению в процессе электролиза. Сумме

этих требований лучше всего удовлетворяет фосфорный ангидрид P_2O_5*. Исследуемый газ пропускают через датчик над тонкой пленкой частично гидратированного P_2O_5, снабженной двумя металлическими электродами, к которым подводится постоянный ток. В датчике непрерывно происходят два процесса: поглощение влаги пленкой с образованием фосфорной кислоты и электролиз воды с регенерацией фосфорного ангидрида:

$$P_2O_5 + H_2O \longrightarrow 2HPO_3;$$

$$2HPO_3 \rightarrow H_2 + \frac{1}{2}O_2 + P_2O_5.$$

Влага из газа должна полностью поглощаться чувствительным элементом и электролиз воды должен быть полным. Для этого напряжение на электродах должно быть не меньше 2 *в* (потенциал разложения воды близок к этой величине), а датчик должен иметь размеры (длину), достаточные для поглощения из потока газа всей влаги. При соблюдении этих условий между обоими процессами наступает равновесие и установившееся значение силы тока, протекающего через электроды, пропорционально произведению абсолютной влажности на расход газа.

Верхний предел напряжения на электродах определяется электрической прочностью датчика.

Согласно закону Фарадея сила тока электролиза в указанных условиях равна:

$$I = c\rho_{\text{п}}q, \ a, \qquad (8\text{-}7)$$

где $\rho_{\text{п}}$ — абсолютная влажность газа, *г/см*^{3} ($\rho_{\text{п}}$ равнозначна плотности водяного пара); q — расход газа (объемный), *см*^{3}*/сек*; c — количество электричества, необходимое для разложения 1 *г* вещества; для воды $c = 1{,}07 \cdot 10^4$ *а · сек/г*.

Используя приведенные в § 6-1 соотношения между различными единицами влажности газов, можно с помощью (8-7) выразить зависимость между I и влагосодержанием газа в миллионных долях — массовых ($x_{\text{м}}$) или объемных (x_0).

---

* Для измерения влагосодержаний, начиная с нескольких сотен м. д., предлагалось использовать в кулонометрических датчиках метафосфат натрия, карбонат калия или гидрат окиси калия, однако эти материалы не нашли практического применения.

Действительно:

$$x_м = 10^6 d = 10^6 \rho_п / \rho_с, \qquad (8\text{-}8)$$

где d — влагосодержание (отношение смеси) в долях единицы; $\rho_с$ — плотность сухого газа;

$$x_0 = x_м / \gamma = 10^6 \rho_п / \gamma \rho_с, \qquad (8\text{-}9)$$

где γ — отношение молекулярной массы водяного пара к молекулярной массе сухого газа; для воздуха $\gamma \approx 0{,}622$.

Из (8-7)—(8-9) получим:

$$I = cq\rho_с x_м 10^{-6} = cq\rho_с \gamma x_0 10^{-6}. \qquad (8\text{-}10)$$

Аналогичные соотношения связывают силу тока I и с другими величинами, характеризующими влажность газа. В кулонометрических гигрометрах расход газа поддерживается постоянным и при постоянных температуре и давлении газа сила тока через датчик пропорциональна влагосодержанию газа.

Уравнения (8-7) и (8-10) можно рассматривать как статические характеристики кулонометрического датчика. При условии, что влага полностью поглощается чувствительным элементом датчика, их можно записать в виде

$$I = kqb, \qquad (8\text{-}11)$$

где b — любая из величин, характеризующих влажность газа; k — статический коэффициент передачи датчика.

Значение коэффициента k определяется принятыми единицами измерения силы тока I и величины b; он является функцией температуры t и давления p газа.

Дополнительные погрешности измерения связаны с влиянием параметров t и p на величину расхода q. Если q_0 — номинальный расход газа при нормальных условиях ($t_0 = 20$ °С и $p = 760$ *мм рт. ст.*), то при условиях измерения значение расхода будет:

$$q = q_0 \frac{(273{,}16 + t) \cdot 760}{293{,}16 p},$$

где t — в °С, p — в *мм рт. ст.* Кулонометрический гигрометр может давать показания в единицах влагосодержания (отношения смеси), не зависящие от t и p, если стабилизировать не объемный, а массовый расход газа. Однако на практике, как правило, используются объемные расходомеры. При условии 100%-ной эффек-

тивности чувствительного элемента[1] кулонометрический метод можно рассматривать как абсолютный, допускающий возможность расчетной градуировки гигрометров.

Основной элемент гигрометра — кулонометрический датчик — имеет различные конструктивные исполнения. Наиболее старая и распространенная модификация — трубчатый датчик (рис. 8-9,*а*) — состоит из цилиндри-

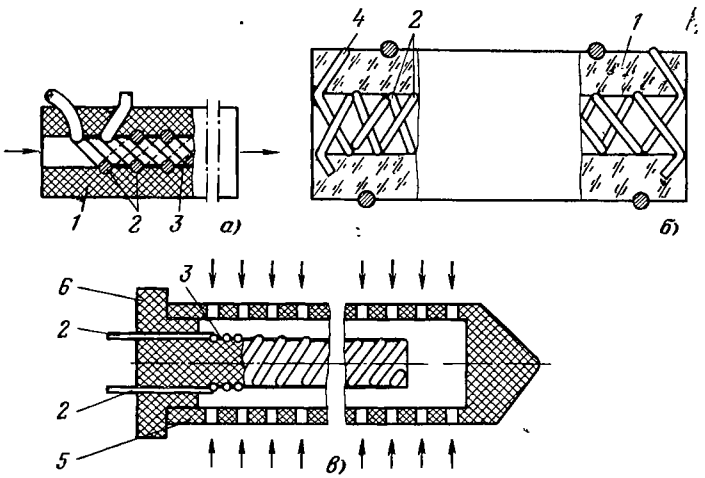


Рис. 8-9. Устройство чувствительных элементов кулонометрического датчика.

а — с пластмассовым основанием; *б* — со стеклянным основанием; *в* — диффузионного; *1* — корпус; *2* — электроды; *3* — пленка P_2O_5; *4* — выводы; *5* — диффузионный барьер; *6* — изоляционный стержень.

ческой втулки из пластмассы (обычно тефлона-фторопласта-4), на внутренней поверхности которого закреплены два проволочных (платиновых) электрода в виде параллельных геликоидальных спиралей. На поверхности между электродами нанесена пленка частично гидратированной пятиокиси фосфора. Фторопластовая трубка закрепляется в корпусе (пластмассовом или металлическом) с контактами для соединения датчика с измерительным устройством. Геометрические размеры чувствительного элемента и расход газа подбираются так, чтобы обеспечить полное извлечение влаги из газа

[1] Под эффективностью датчика подразумевается отношение количества влаги, поглощенного датчиком, к полному количеству влаги в прошедшем через датчик объеме газа.

при заданном верхнем пределе измерения. У «стеклянных» чувствительных элементов влагопоглощающее вещество нанесено на подложку из стекла. Применение стеклянного основания (или корпуса) уменьшает возможность коротких замыканий между электродами и проникновения водяного пара через пластмассовую оболочку, обладающую некоторой пористостью. На рис. 8-9,*б* показана конструкция стеклянного чувствительного элемента. Платиновые электроды, между которыми нанесена пленка P_2O_5, вплавлены во внутренний канал стеклянной трубки; выводы электродов также вплавлены в стекло.

Известны и другие конструктивные исполнения стеклянного элемента, например в виде U-образной стеклянной капиллярной трубки, закрепленной в пластмассовом основании, или кварцевого стержня, несущего на своей внешней поверхности электроды и пленку. Стержень закреплен по оси цилиндрического полого корпуса из нержавеющей стали [Л. 8-24]. Если корпус (или часть его) изготовлен из стеклянной трубки, можно визуально контролировать состояние влагосорбирующей пленки и электродов.

В одной из последних конструкций [Л. 8-25] на поверхность круглого диска из отожженного стекла наносят техникой печатных схем электроды (платиновые с родиевым покрытием) в виде четырех групп параллельных дугообразных элементов.

Для измерений влагосодержаний выше 1 000 м. д., в частности для метеорологических измерений влажности воздуха, был разработан [Л. 8-26] диффузионный датчик, в котором часть влаги из исследуемого газового потока диффундирует сквозь пористый гидрофобный барьер, а затем подвергается электролизу. Скорость диффузии не зависит от скорости воздуха; в диффузионном гигрометре отпадает необходимость в регуляторе расхода газа, так как его функции выполняет диффузионный барьер. Зависимость силы тока электролиза от влагосодержания у диффузионного датчика линейна в широких пределах; его недостаток — существенное увеличение инерционности, особенно в диапазоне низких влагосодержаний. Основной величиной, влияющей на диффузию водяных паров, является температура. Температурная погрешность диффузионного гигрометра составляет 0,6—0,7% на 1 °С.

У диффузионного чувствительного элемента (рис. 8-9,*в*) электроды и пленка P_2O_5 расположены на внешней поверхности стеклянного или фторопластового стержня, а диффузионным барьером служит коаксиальная со стержнем перфорированная трубка из фторопласта.

В последние годы предложено много усовершенствований конструкций и технологии изготовления кулонометрических датчиков [Л. В-3]. К важнейшим относятся замена традиционных платиновых электродов родиевыми (проволока из чистого родия, сплавов Rh+Pt, Rh+Ir или платиновая с родиевым покрытием). Родиевые элек-

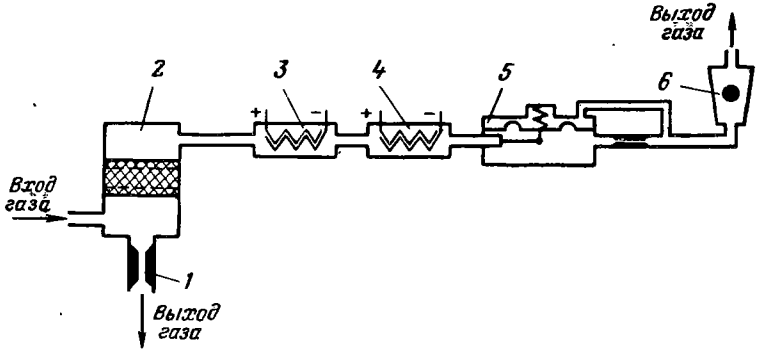


Рис. 8-10. Газовая схема кулонометрического гигрометра.

троды повышают срок службы датчиков благодаря предотвращению возникновения платиновой черни в междуэлектродном пространстве и устраняют погрешности от рекомбинации водорода с кислородом в воду. В процессе рекомбинации, который имеет место особенно при высоких концентрациях водорода в исследуемом газе, платина может играть роль активного катализатора; родий обладает меньшей каталитической активностью.

Некоторые исследователи считают преувеличенной опасность образования «вторичной воды»; экспериментальные данные, полученные в [Л. 8-27], свидетельствуют о возможности пренебрежения этой погрешностью при измерении влажности водорода в широких пределах датчиком с платиновыми электродами.

Рассмотрим типовую газовую схему кулонометрического гигрометра на примере прибора для низких дав-

лений (0,1—2 *кгс/см*^{2}) Ангарского филиала ОКБ автоматики (рис. 8-10). Большая часть анализируемого газового потока перед фильтром тонкой очистки *2* ответвляется через постоянный дроссель *1* в дренаж с целью уменьшения инерционности измерения. Исследуемый поток проходит через кулонометрические датчики — рабочий *3* и контрольный *4*; последний позволяет контролировать эффективность рабочего датчика. При «проскоке» влаги, вызванном, например, обрывом электродов, загрязнением влагочувствительной пленки или отсутствием напряжения питания рабочего датчика, показания контрольного датчика увеличиваются выше установленного предела. В отдельных случаях, когда длина рабочего чувствительного элемента недостаточна для полного поглощения влаги, контрольный элемент непрерывно участвует в измерении и служит продолжением рабочего. Газовый поток, уносящий продукты электролиза (водород и кислород), проходит через стабилизирующий регулятор расхода *5*, индикатор расхода (обычно ротаметр) *6* и отводится в дренаж. При более высоких давлениях (до 60 *кгс/см*^{2}) газовая смесь поступает через редуктор давления, который в сочетании с постоянным дросселем после фильтра заменяет регулятор давления. Наконец, при давлениях до 400 *кгс/см*^{2} на байпасной линии устанавливают переменный игольчатый дроссель, из схемы исключают ротаметр и применяют редуктор высокого давления.

Описанная схема может иметь дополнительные узлы — побудитель расхода газа при разрежениях (0,05—0,1 *кгс/см*^{2}), фильтр грубой очистки, если анализируется газ с высоким содержанием механических примесей, и т. д. Основное требование ко всем деталям газового тракта — минимизация сорбционного запаздывания — реализуется подбором материалов (фторопласт, нержавеющая сталь) и высокой степенью чистоты обработки металлических поверхностей.

Измерительное устройство кулонометрических гигрометров отличается простотой. Последовательно с датчиком и источником постоянного тока включен многопредельный прибор, измеряющий силу тока электролиза.

Измерительная схема лабораторного гигрометра (рис. 8-11,*а*) получает питание от сети переменного тока через трансформатор *Тр*, выпрямитель *В* и стабилизатор напряжения, собранный на кремниевых диодах $Д_1$—$Д_8$.

Схема содержит рабочий *Э1* и контрольный *Э2* датчики. В цепь рабочего датчика включен микроамперметр *П* с универсальным шунтом (резисторы R_1—R_8) и переключателем диапазонов измерений. Падение напряжения на резисторе R_9 (10 *мв*) можно подать на автоматический потенциометр. Контрольный датчик *Э2* в измерении не участвует. Его включают в измерительную цепь нажатием кнопки *К*; при этом суммарный ток элек-

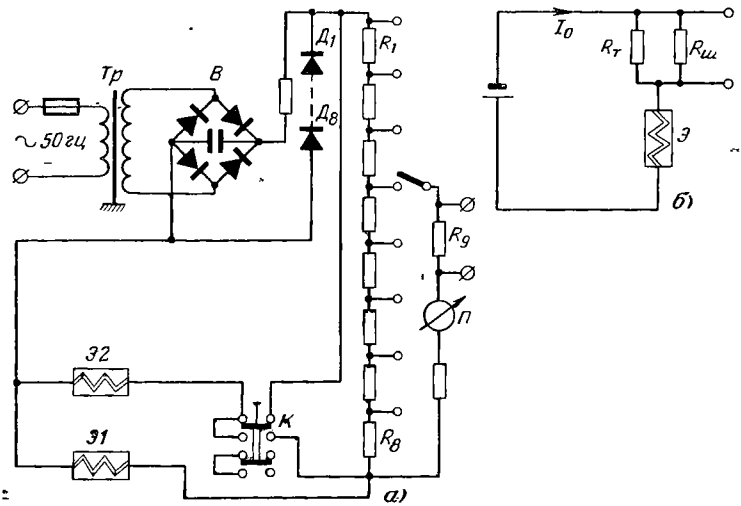


Рис. 8-11. Принципиальные электрические схемы.
а — гигрометра «Сибирь»; *б* — термокомпенсатора.

тролиза обоих параллельно включенных датчиков не должен превышать ток рабочего датчика больше, чем на установленную величину.

В промышленных приборах автоматически компенсируется температурная погрешность с помощью термокомпенсатора (рис. 8-11,*б*), состоящего из медного терморезистора $R_т$, шунтированного постоянным сопротивлением $R_ш$. Термокомпенсатор включен в цепь рабочего датчика *Э* параллельно делителю напряжения.

Перейдем к рассмотрению метрологических и других характеристик кулонометрических гигрометров. Верхний предел измеряемой влажности ограничен пробивным напряжением влагочувствительной пленки и необходимостью увеличения длины чувствительного элемента для

полного поглощения влаги. Этот предел можно повысить, применяя диффузионный метод. Другой способ заключается в разбавлении исследуемого газа сухим (например, азотом) в постоянном соотношении. При рециркуляционном разбавлении анализируемый газ на входе в датчик непрерывно разбавляется сухим газом, отбираемым с выхода датчика.

Нижний предел измерений связан с особенностями измерений в диапазоне очень низких влагосодержаний (ниже 10 м. д.). Как уже отмечалось, при этом возникают затруднения, обусловленные адсорбцией и диффузией водяного пара через коммуникации и их элементы; кроме того, необходимо принимать во внимание ток фона.

Можно принять, что сила тока, показываемая измерительным прибором кулонометрического гигрометра, равна:

$$I = I_{H_2O} + I_ф + I_в,$$

где I_{H_2O} — сила тока электролиза воды, поглощенной чувствительным элементом, являющаяся полезным сигналом датчика; $I_ф$ — сила фонового тока, определяемая остаточным сопротивлением чувствительного элемента; $I_в$ — сила тока, вызванного соединением водорода и кислорода с образованием «вторичной» воды.

Последняя слагаемая в большинстве случаев пренебрежимо мала. Фоновый ток можно рассматривать как сумму двух составляющих — тока $I_э$ неионной (электронной и дырочной) проводимости сорбента и внутренней поверхности чувствительного элемента и тока электролиза ($I_п$) влаги, проникшей в чувствительный элемент из внешней среды.

Величину $I_ф$ можно определить одним из трех способов, дающих равноценные результаты:

а) пропусканием через датчик сухого газа в течение времени, достаточного для получения $I_{H_2O} = 0$;

б) прекращением потока газа через датчик и осушением системы посредством электролиза;

в) измерением силы тока электролиза при двух значениях расхода газа.

Первый способ менее удобен и значительно более длителен, чем второй; третий является наиболее быстрым.

Экспериментальные исследования [Л. 8-28] показали,

что выбором конструкции, материалов и технологии изготовления датчика и газовой схемы можно уменьшить обе составляющие до ничтожно малых величин: $I_э$ примерно до 0,1 *мка*, $I_п$ — до 0,05 *мка*. Имеется, следовательно, возможность измерения влагосодержаний, значительно меньших 1 м. д.; практическими ограничениями нижнего предела являются трудности градуировки гигрометров в диапазоне микроконцентраций (см. § 11-2), а также возможность изменения фонового тока в процессе эксплуатации гигрометра.

Для измерений микроконцентраций влаги кулонометрическими гигрометрами применяется циклический метод, заключающийся в дискретных измерениях, выполняемых на отдельных пробах газа в течение времени $t_и$, и определении количества электричества Q, прошедшего через чувствительный элемент $Q=\int_0^{t_и} I\,dt$.

В первоначальном варианте данного метода [Л. 0-1] электролиз вели в течение времени, необходимого для того, чтобы ток через датчик стал равным току фона ($I=I_ф$), а влажность газа определяли в результате деления величины Q на объем V пробы газа. В гигрометрах ОКБА, основанных на циклическом методе, газ с точно стабилизированным расходом непрерывно проходит через чувствительный элемент, электроды которого периодически через равные промежутки времени отключаются от источника тока на время, используемое для накопления влаги во влагочувствительной пленке. Электронный интегратор (операционный интегрирующий усилитель) дает выходное напряжение, пропорциональное величине Q, а следовательно, и влажности исследуемого газа.

Из уравнения статической характеристики кулонометрического гигрометра следует, что его основная погрешность равна сумме погрешностей измерения силы тока I электролиза и измерения (или регулирования) расхода q газа. Важной составляющей систематической погрешности может стать также погрешность $\delta_п$, обусловленная неполнотой поглощения влаги чувствительным элементом. Погрешность $\delta_п$ можно минимизировать оптимальным выбором размеров датчика и величины q. Составляющую систематической погрешности, связанную с фоновым током, принимают во внимание лишь

при измерениях микроконцентраций влаги. Важнейшие дополнительные погрешности обусловлены колебаниями температуры и давления газа.

Динамические свойства кулонометрических гигрометров определяются запаздыванием и инерционностью газоподводящей системы и влагочувствительного элемента. Инерционность газового тракта зависит от скорости газа, внутреннего объема коммуникаций и элементов тракта, а также от материала, из которого они изготовлены. Как уже отмечалось, эта величина у коммуникаций из фторопласта и нержавеющей стали во много раз меньше, чем у медных и особенно алюминиевых. Постоянная времени кулонометрического чувствительного элемента по [Л. 8-27] прямо пропорциональна площади сечения сорбента и обратно пропорциональна квадратному корню произведения измеряемой влажности, удельной проводимости сорбента и напряжения, приложенного к электродам. Температура газа, от которой зависит проводимость сорбента, оказывает большое влияние на быстродействие датчика. Так, при понижении температуры с 30 до —6 °С постоянная времени увеличивается почти на порядок. Постоянная времени кулонометрического датчика при понижении влажности газа больше, чем при ее повышении. У серийных приборов она равна соответственно 2—4 и 1,5—2,5 *мин*.

Опыт эксплуатации кулонометрических гигрометров показывает, что основным источником отказов является чувствительный элемент. Одной из основных причин выхода из строя является образование между электродами «мостиков» из платиновой черни, замыкающих электроды накоротко и загрязняющих канал. Образованию «мостиков» платиновой черни в значительной мере способствует работа датчика при повышенных влагосодержаниях; длительная работа в таких условиях, а также кратковременные перегрузки по влажности существенно сокращают срок службы датчиков. Кроме того, указанному процессу содействует озон, выделяющийся в полости датчика, например, при его регенерации ортофосфорной кислотой. Значительно меньший процент отказов обусловлен дефектами и повреждением отдельных элементов датчиков.

Важнейшим внешним фактором, вызывающим явные и «скрытые» отказы (под последними подразумевается увеличение погрешности без выхода из строя), является

наличие в анализируемом газе некоторых примесей. Нормальная работа кулонометрического датчика возможна лишь в газовых смесях, которые не содержат компонентов, вступающих в реакцию с веществом сорбента или агрессивных по отношению к материалам деталей датчика, соприкасающихся с газом. К такого рода опасным компонентам относятся щелочные составляющие, примеси аммиака и аэрозоли, содержащие щелочи, ацетон, спирты, разлагающиеся на активной пленке с образованием эфиров и воды, полимеризующиеся компоненты углеводородных газов — газообразные непредельные углеводороды, фтористый водород, разрушающий при электролизе материал анода, и некоторые другие соединения. Полимеризация примесей на пленке сорбента или реакции с ней, засорение механическими примесями или обволакивание пленкой масла вызывают «проскоки» влаги, а затем полный выход из строя датчика. Чувствительный элемент кулонометрического гигрометра является восстанавливаемым изделием — после выхода из строя его можно регенерировать по методике, предписанной изготовителем.

Для датчиков на пластмассовой основе характерно уменьшение времени наработки на отказ после каждой регенерации. От этого недостатка свободны датчики на стеклянной основе, у которых допустима многократная регенерация. Надежность этих датчиков значительно выше надежности датчиков на пластмассовой основе.

Если не считать отмеченных недостатков (чувствительность к некоторым примесям и необходимость точной стабилизации расхода газа), кулонометрические датчики имеют ряд преимуществ по сравнению с ЭГД других типов. К важнейшим относятся широкие пределы измерений, возможность работы в широком диапазоне температур и давлений, независимость основной характеристики от химического состава анализируемой смеси (за исключением «вредных» примесей), величины напряжения источника питания, формы и размеров электродов и влагочувствительной пленки. Кулонометрические датчики взаимозаменяемы и не требуют новой градуировки после регенерации. Они имеют естественную выходную величину, удобную для измерения простыми техническими средствами; эта величина пропорциональна влагосодержанию анализируемого газа, если стабилизированы его параметры.

Кулонометрический метод является основным в области измерения малых влагосодержаний. Его применение непрерывно расширяется во многих отраслях народного хозяйства и научных исследований.

Глава девятая

ГИГРОМЕТРЫ, ОСНОВАННЫЕ НА ИЗМЕРЕНИИ ФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ГАЗОВ

9-1. ГИГРОМЕТРЫ, ОСНОВАННЫЕ НА ИЗМЕРЕНИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ГАЗОВ

К данной категории относятся диэлькометрические гигрометры диапазонов средних и коротких волн и СВЧ, а также гигрометры на принципе коронного разряда.

Основой диэлькометрического метода является зависимость диэлектрической проницаемости газов от их влагосодержания. Диэлектрическая проницаемость воздуха и других газов в абсолютно сухом состоянии (ε'_c) мало отличается от ε вакуума; в табл. 9-1 приведены значения ε'_c некоторых газов при температуре 20 °С и давлении 760 *мм рт. ст.*

Таблица 9-1

Газ	ε'_c	Газ	ε'_c
Воздух	1,000574	Кислород	1,000532
Азот	1,000587	Углекислый газ . . .	1,000988
Водород	1,000710	Аргон	1,000555

При изменении влагосодержания ε' изменяется незначительно: изменению относительной влажности воздуха на 1% при температуре 20 °С соответствует изменение ε' приблизительно на 2×10^{-6}. Для измерения влажности газов диэлькометрическим методом необходимы, следовательно, технические средства, позволяющие определять ε' с точностью до пятого-шестого знаков (после запятой). На практике, как и в диэлькометрических влагомерах (§ 4-2 и 4-3), измерения выполняются в диапазоне низких радиочастот — до 10 *Мгц* (максимум до 50 *Мгц*) или при СВЧ — преимущественно на

сантиметровых волнах. В последнем диапазоне используются методы и устройства СВЧ рефрактометрии, нашедшей широкое применение для исследования распространения радиоволн в тропосфере.

Известен ряд эмпирических формул, связывающих ε' газа с его влажностью, температурой или давлением, причем, как это принято в СВЧ-рефрактометрии, ε' выражается через коэффициент преломления $n=\sqrt{\varepsilon'}$ или индекс (показатель) преломления $N=(n-1)10^6$.

По [Л. 9-1] показатель преломления атмосферного воздуха определяется уравнением

$$N=\frac{A_1(p-e)}{T}+\frac{A_2e}{T}+\frac{A_3e}{T^2},$$

где A_1, A_2, A_3 — эмпирические постоянные; p — давление воздуха; e — парциальное давление водяного пара; T — термодинамическая температура воздуха.

Для широких диапазонов частот (0—30 *Гц*), температур (—50÷+40 °С), давлений (200—1 100 *мбар*) и парциальных давлений (0—30 *мбар*) были предложены формулы [Л. 9-2]:

$$N=77{,}6\,\frac{p-e}{T}+72\,\frac{e}{T}+3{,}75\cdot10^5\,\frac{e}{T^2},$$

или в упрощенной форме

$$N=\frac{77{,}6}{T}(p+4\,810e/T)\ (p \text{ и } e \text{ — в } мбар,\ T \text{ — в } ^\circ\text{K}).$$

Эти формулы, основанные на обработке экспериментальных данных многих исследователей, нашли широкое применение; они позволяют вычислить относительную влажность воздуха:

$$\varphi=2{,}68\cdot10^{-4}\,\frac{pT}{E}(TN-77{,}6p),\ \%$$

где E — упругость насыщенного пара, *мбар*, при температуре T.

Относительное влияние параметров воздуха на результат измерения N было выражено значениями чувствительности, полученными [Л. 9-3] в лабораторных условиях:

$\partial N/\partial T=-1{,}2\ ^\circ\text{K}^{-1}$; $\partial N/\partial p=0{,}3\ мбар^{-1}$; $\partial N/\partial e=4\ мбар^{-1}$.

Диэлькометрические гигрометры, работающие при низких радиочастотах, нашли весьма ограниченное применение. Для получения необходимой чувствительности и точности в их измерительных устройствах применяется преимущественно метод биений; конструкция датчиков определяется задачей, для которой предназначен гигрометр, а его размеры — также необходимостью повышения чувствительности, т. е. увеличения площади электродов и уменьшения расстояния между ними. Особенностью емкостных датчиков гигрометров является также то, что их $\operatorname{tg}\delta$ определяется почти исключительно потерями в изоляционных деталях, так как проводимость газов ничтожно мала.

Возможность использования датчика весьма малых размеров и безынерционность измерения послужили основанием для применения рассматриваемого метода в биологических исследованиях — для контроля влажности воздуха, вдыхаемого и выдыхаемого человеком, а также для измерения градиентов влажности.

В [Л. 9-4] были предложены датчики с внешним полем (полем рассеяния) с подложкой из твердого гидрофобного непористого диэлектрика (ситал, кварц, фторопласт), на который наносятся электроды, например, в форме меандра. При этом измеряют диэлектрические свойства адсорбционной пленки, образующейся на поверхности диэлектрика, которые характеризуют относительную влажность окружающей газовой среды. По механизму действия такие датчики близки к ЭГД сорбционного типа (§ 8-2).

Емкость конденсаторного датчика сильно увеличивается при появлении влаги в жидкой фазе в междуэлектродном пространстве или на поверхности обкладок. В связи с этим диэлькометрический метод был применен для измерения количества капельной воды в потоке воздуха.

Фактором, который может в значительной степени исказить результаты измерения, является загрязнение исследуемого газа парами других жидкостей. Это относится в первую очередь к парам полярных жидкостей с высокой ε: ацетона, четыреххлористого углерода, хлороформа, этилового спирта и т. д.

Гигрометры СВЧ основаны на резонаторном методе (другие СВЧ-методы измерения не применялись в гигрометрии) и работают чаще всего на длинах волн,

близких к 3 *см*. Датчиками служат объемные резонаторы различных типов, имеющие высокую добротность и полностью заполненные анализируемым газом. При этом диэлектрические параметры определяются выражениями, справедливыми для резонаторов всех типов:

$$\varepsilon' - 1 = 2\frac{f_0 - f}{f_0};$$

$$\operatorname{tg}\delta = \frac{1}{\varepsilon'}\left(\frac{1}{Q} - \frac{1}{Q_0}\right),$$

где f_0, Q_0 — резонансная частота и добротность пустого резонатора; f, Q — эти же параметры резонатора, заполненного газом.

Иногда добротность резонатора оценивают по отношению мощностей P_0/P, прошедших через резонатор при частотах f_0 и f:

$$Q_0/Q = (P_0/P)^{1/2}.$$

Как правило, измерение основано на сравнении резонансных частот двух резонаторов — измерительного, в который поступает контролируемый газ, и опорного, заполненного образцовым газом.

Измерительные схемы известных гигрометров СВЧ основаны на двух различных принципах. Объемный резонатор может служить элементом, задающим частоту колебаний генератора СВЧ; измерительная схема содержит два генератора (соответственно с измерительным и опорным резонаторами), разность частот которых измеряется, например, методом биений. В схемах второй группы в элементе сравнения сопоставляются выходные величины двух цепей с измерительным и опорным резонаторами. Обе цепи питаются от общего генератора, и их выходные величины связаны с разностью резонансных частот резонаторов.

Блок-схема гигрометра по первому принципу (рис. 9-1) содержит два клистронных генератора: $Г_1$ — измерительный и $Г_2$ — опорный, частоты которых определяются резонансными частотами объемных резонаторов B_1 и B_2. В первый резонатор непрерывно поступает контролируемый воздух; второй (f_0=9,4 *Гц*) герметически закрыт и откачан до вакуума. Разность частот обоих генерато-

ров Δf, изменяющаяся в функции показателя преломления воздуха, поступающего в B_1, преобразуется в блоке M (содержащем смеситель, усилитель, ограничитель, частотный детектор и звенья настройки) в напряжение постоянного тока, измеряемое показывающим или записывающим прибором $П$.

Описанная схема была в последующем усовершенствована введением цифрового выходного устройства и

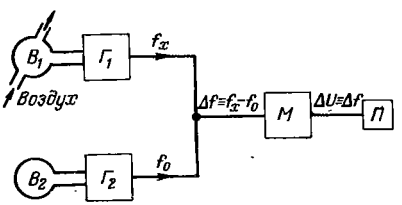


Рис. 9-1. Блок-схема гигрометра СВЧ по методу биений.

автоматической компенсации погрешностей от изменений температуры и давления.

Рефрактометр, основанный на втором из рассмотренных принципов [Л. 9-5], содержит один клистронный генератор *1* (рис. 9-2) с несущей частотой 9 100 *Мгц*;

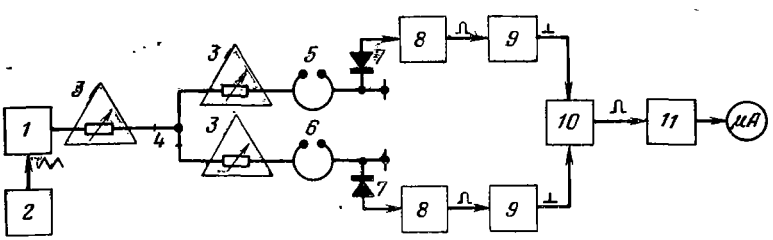


Рис. 9-2. Блок-схема рефрактометра СВЧ.

частота генератора модулируется генератором *2* пилообразного напряжения низкой частоты (120 *гц*). Мощность СВЧ через аттенюатор *3* и волноводный тройник *4* поступает в два одинаковых тракта, содержащих объемные резонаторы — измерительный *5* и опорный *6*. К выходу резонаторов через полупроводниковые диоды *7* присоединены усилители *8* с полосой пропускания 35—3 000 *гц*, управляющие через ограничители *9* триггерной

схемой *10*. Ограничители подрезают пик резонансного сигнала; импульсы первого тракта запускают триггер *10*, импульсы второго — отключают его. Выходной сигнал триггера — прямоугольные импульсы постоянной амплитуды, но переменной ширины — поступает на усилитель *11*, к выходу которого подключен показывающий прибор (микроамперметр).

Средняя величина выходного сигнала триггера и сила тока, измеряемого показывающим прибором, пропорциональны длительности импульсов, т. е. разности частот резонаторов.

Описанный метод был применен и в ряде других гигрометров.

Гигрометры СВЧ градуируются эмпирически, причем для этой цели применялись неполярные газы (N_2, H_2), у которых электрическую восприимчивость можно считать пропорциональной плотности. Из источников погрешностей СВЧ гигрометров важнейшим является температура. Для устранения температурной погрешности резонаторы иногда термостатируют; можно также изготовлять оба резонатора в виде двух полостей в одном блоке металла. Лучшим материалом для изготовления резонаторов является инвар или аналогичные сплавы. Для устранения ошибок, связанных с колебаниями атмосферного давления, в некоторых рефрактометрах резонаторы заключены в металлические полые камеры, внутреннее пространство которых эвакуировано.

Метрологические качества СВЧ гигрометров — точность и чувствительность — в значительной степени определяются их устойчивостью. Недостатком приборов по схеме с модуляцией частоты является дрейф нуля. Долговременный дрейф обусловлен главным образом непостоянством характеристик клистронов; его причинами могут быть также температурные погрешности, изменения ε образцового газа, изменения амплитуды модулирующего напряжения и т. д.

Для повышения устойчивости и точности рефрактометра можно применить нулевой компенсационный метод с использованием в качестве уравновешивающего органа резонатора, снабженного подстроечным механизмом с поршнем или штырьком, изменяющими рабочий объем резонатора.

При тщательном изготовлении рефрактометров со всеми перечисленными предосторожностями были до-

стигнуты весьма высокие показатели. У лучших рефрактометров погрешность измерения (при стабилизации температуры и давления) была близка к 1—2N, что соответствует $\sim 1\%$ относительной влажности при температуре 20 °С.

Таким образом, важнейшими достоинствами метода СВЧ являются высокие чувствительность и точность, а также качества, общие для всех спектрометрических методов: безынерционность измерения, отсутствие воздействия на исследуемый газ, применимость в широком диапазоне температур и давлений, интегральная оценка влажности газа на пути излучения. В то же время измерительная аппаратура, применяемая в этом методе, сложна и имеет высокую стоимость. Применение низких радиочастот позволяет существенно упростить аппаратуру, но при этом сильно ухудшаются точность и чувствительность измерения. При любых частотах результаты измерения влажности зависят от температуры и давления газа; необходимо стабилизировать эти параметры или компенсировать их влияние. Источником больших погрешностей может служить наличие в анализируемом газе загрязнений, капельной влаги, паров некоторых жидкостей и других газов. По указанным причинам и главным образом из-за сложности аппаратуры гигрометры СВЧ до сих пор почти не применялись для контроля производственных процессов. Они использовались преимущественно в качестве авиационных бортовых приборов для зондирования влажности атмосферы на различных высотах, определения содержания влаги в облаках, изучения структуры водяного пара атмосферы и других аналогичных задач. Для радиозондов был разработан малогабаритный гигрометр с конденсаторным датчиком, имеющим пластины из инвара и предназначенным для широкого диапазона частот — от 10 *Мгц* до 25 *Гц*. Примером применения гигрометров СВЧ в научных исследованиях других областей может служить измерение упругости водяного пара над поверхностью листьев растений, выполненное с помощью миниатюрного резонатора (диаметр 45 *мм*, высота 30 *мм*), в который воздух засасывался с помощью иглы для инъекций [Л. 9-3].

Гигрометры с датчиками коронного разряда основаны на влиянии влажности газа на параметры коронного разряда — стационарного электриче-

ского разряда, возникающего в сильном неоднородном электрическом поле. Выходной величиной датчика коронного разряда может служить сила тока, протекающего через электроды при постоянной величине приложенного напряжения, большего, чем напряжение начала короны, и меньшего, чем напряжение пробоя. Гигрометры этого типа были разработаны в последние годы [Л. 9-6].

Исследование датчиков с различными типами газоразрядных промежутков показало, что оптимальным является датчик в виде коаксиальных цилиндров. Элек-

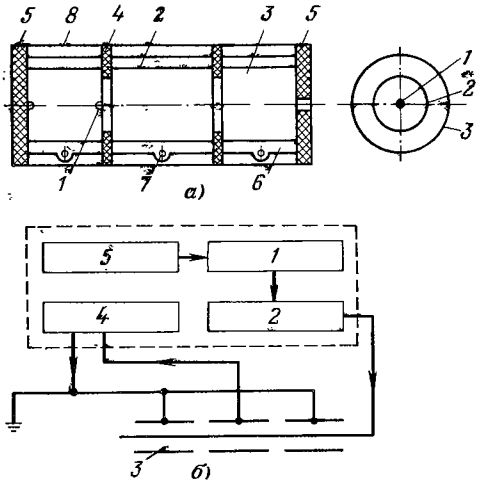


Рис. 9-3. Гигрометр коронного разряда.
а — датчик; *б* — блок-схема гигрометра.

троды в виде иглы нестабильны, так как в процессе разряда острие подвергается эрозии. Высокое напряжение подается на внутренний (коронирующий) электрод, и разряд происходит между ним и внешним электродом, причем диаметр внутреннего электрода значительно меньше междуэлектродного промежутка. В выполненных датчиках внутренний электрод изготовлялся из вольфрамовой проволоки диаметром 0,1 *мм*, натянутой между торцами цилиндра. Датчик, предложенный в [Л. 9-6а], имеет внешний электрод из металлической сетки, металлической или металлизированной ткани или

другого газо- и влагопроницаемого и токопроводящего материала. Благодаря этому создается возможность измерений в неподвижной среде, отпадает необходимость в устройствах для подвода и отвода газа и рабочее пространство датчика предохраняется от попадания механических загрязнений газа. Для улучшения формы поля по обе стороны внешнего электрода *2* (рис. 9-3,*а*), охватывающего проволочный электрод *1*, располагаются электроды *3*, электрически отделенные от измерительного электрода изолирующими шайбами *4*. Электроды *3* находятся под тем же потенциалом, что и электрод *2*. Электрод *1* расположен на изолирующих шайбах *5*. Газопроницаемые электроды *2* и *3* для придания им механической прочности укрепляются ребрами жесткости *6*, на которых располагаются электрические клеммы *7*. В случае использования датчика в быстрых газовых потоках или при необходимости электрической экранировки электрода *2* от внешних электромагнитных полей датчик помещают в кожух *8*, который является также механическим фильтром крупных пылевых включений в исследуемом газе и замедлителем газового потока.

Для повышения чувствительности измерения можно увеличить длину датчика и число коронирующих электродов. Гигрометр (рис. 9-3,*б*) состоит из высоковольтного блока *1*, стабилизатора напряжения *2*, датчика *3*, выходного измерительного прибора *4* и блока питания *5*. На вольт-амперной характеристике датчика можно выделить две зоны [Л. 9-7]. В области повышенных напряжений, приближающихся к напряжению пробоя, сила тока разряда уменьшается с ростом влажности; во второй зоне (пониженные напряжения) сила тока возрастает с увеличением влажности. Промежуточный диапазон напряжений непригоден для измерений влажности. Первая зона (повышенные напряжения) благоприятна для измерений низких влагосодержаний; в ней можно увеличивать чувствительность гигрометра, повышая напряжение до предела, допустимого по пробою. У опытного образца гигрометра сила тока короны изменялась в пределах 0—150 *мка* при напряжениях 3,5—5,5 *кв*.

Оптимальным для гигрометров является диапазон средней напряженности поля с коэффициентом неоднородности (отношением максимального градиента электрического поля к среднему значению) в пределах 20—

50; этому диапазону соответствует достаточно высокая чувствительность датчика, а для стабилизации высоковольтного источника напряжения можно применить достаточно простые типовые устройства. Эксперименты показали возможность измерений методом коронного разряда при нормальном атмосферном давлении и температурах от —5÷0 °С до +200 °С и выше. Во избежание воздействия озона, образующегося в газоразрядном промежутке, на коронирующий электрод скорость газового потока в этом промежутке должна быть не ниже определенного значения (2—3 *м/сек* для датчиков диаметром 10 *мм*); это является необходимым условием для сохранения устойчивости вольт-амперной характеристики. Малая инерционность гигрометров коронного разряда позволяет применить их и для измерения влажности твердых тел по методу гигротермического равновесия (см. § 10-2), однако пока еще нет достаточного опыта практического применения этих приборов и в самой гигрометрии.

9-2. СПЕКТРОСКОПИЧЕСКИЕ И РАДИОМЕТРИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ

Колебательно-вращательный спектр воды в ближней инфракрасной области при длинах волн $\lambda > 0{,}9$ *мкм* содержит ряд интенсивных полос поглощения с центрами около $\lambda = 0{,}94$; 1,1; 1,38; 1,87; 2,7; 3,2; 3,6; 6,3 *мкм* [Л. 9-8].

Поглощение отдельной линии с частотой ν описывается основным законом спектроскопических определений концентрации — законом Буггера — Беера:

$$I(\nu) = I_0(\nu)\, e^{-k(\nu) l} \qquad (9\text{-}1)$$

или в дифференциальной форме

$$dI(\nu) = -k(\nu) I(\nu)\, dl, \qquad (9\text{-}2)$$

где $I_0(\nu)$ и $I(\nu)$ — интенсивности излучения до и после прохождения через слой среды массовой толщиной l; $dI(\nu)$ — ослабление интенсивности $I(\nu)$ при прохождении через слой с массовой толщиной dl; $k(\nu)$ — коэффициент поглощения среды при частоте излучения ν.

В случае смеси газов, у которых поглощение не зависит от других компонентов смеси,

$$I = I_0 \exp - \left(\frac{k_1 \rho_1}{\rho_{10}} + \frac{k_2 \rho_2}{\rho_{20}} + \ldots + \frac{k_i \rho_i}{\rho_{i0}} \right) l, \qquad (9\text{-}3)$$

где ρ_i, ρ_{i0} — плотность i-го газа соответственно в момент измерения и при нормальных значениях температуры и давления.

Для немонохроматического излучения, т. е. для групп перекрывающихся линий в интервале длин волн λ_1—λ_2 величина I является функцией λ:

$$I = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} I_0(\lambda) \left\{ \exp - \left(\frac{k_1(\lambda) \rho_1}{\rho_{10}} + \frac{k_2(\lambda) \rho_2}{\rho_{20}} + \ldots + \frac{k_i(\lambda) \rho_i}{\rho_{i0}} \right) l \right\} d\lambda. \qquad (9\text{-}4)$$

Для водяного пара в реальных газах уравнения (9-1)—(9-4) имеют ряд ограничений, связанных как со свойствами водяного пара и газов, так и с аппаратурой, применяемой для исследования поглощения.

Молекулы H_2O характеризуются прерывистым спектром поглощения, состоящим из многочисленных, близко расположенных линий, различных по протяженности и интенсивности. Реальная величина коэффициента поглощения $k(\nu)$ не постоянна, а зависит от концентрации водяного пара (за исключением диапазона очень низких концентраций), величины $I_0(\nu)$, а также парциального давления непоглощающих компонентов смеси. Результаты измерений спектров поглощения зависят от разрешающей способности спектрометрического прибора, в частности от ширины спектральной щели, которая даже у спектрометров высокого разрешения больше ширины отдельных линий вращательно-колебательных полос H_2O.

Перечисленные и некоторые другие факторы приводят к необходимости использования функций поглощения, полученных экспериментальным путем и связывающих поглощение с величинами концентрации влаги, давления и температуры воздуха. Экспериментальная функция поглощения A измеряется в определенном спектральном интервале (частоты ν_1—ν_2) и представляет собой отношение радиации, поглощенной слоем среды,

к падающей на этот слой:

$$A = \frac{\int_{\nu_1}^{\nu_2} [I_0(\nu) - I(\nu)]\, d\nu}{\int_{\nu_1}^{\nu_2} I_0(\nu)\, d\nu}.$$

Говард и др. [Л. 9-8] на основании экспериментальных данных, полученных при исследовании поглощения искусственных смесей H_2O с инертным газом (сухой азот), моделирующих воздух в условиях нижних слоев атмосферы, предложили следующие формулы:

для малых значений интегрального поглощения полос

$$\int_{\nu_1}^{\nu_2} A(\nu)\, d\nu = cw^{1/2}(p+e)^k; \qquad (9\text{-}5)$$

для больших значений интегрального поглощения

$$\int_{\nu_1}^{\nu_2} A(\nu)\, d\nu = C + D \lg w + K \lg (p+e), \qquad (9\text{-}6)$$

где p — полное давление газовой смеси; e — парциальное давление водяного пара; w — осажденный слой воды, равный толщине слоя воды, получаемой при конденсации водяного пара на всей длине оптического пути.

Величина w, *мм*, связана с абсолютной влажностью a, *г/м*^{3}, и длиной оптического пути l, *м*, простым соотношением $w = al10^{-3}$.

Эмпирические константы c, k, C, D, K имеют постоянное значение в пределах определенной полосы.

Формулы Говарда были получены при температурах, близких к +20 °С, и не учитывают влияния температуры; это влияние отражено в уравнении Эльзассера:

$$A = k \sqrt{\frac{p}{p_0}} \sqrt[4]{\frac{T_0}{T}} \sqrt{w}, \qquad (9\text{-}7)$$

где p_0, T_0 — исходные (градуировочные) давление и абсолютная температура воздуха; p, T — эти же параметры исследуемого воздуха; k — коэффициент, величина которого зависит от используемого участка спектра излучения и частично от влагосодержания воздуха.

В 40-х годах в инфракрасной гигрометрии применялись спектрофотометрические приборы. В последующем благодаря появлению возможности выделения монохроматических пучков излучения с помощью узкополосных интерференционных фильтров получили распространение более простые, специализированные ИК-гигрометры. Эти приборы по своему устройству сходны с ИК-влагомерами (§ 5-3) и тоже могут быть построены по одно- и двухлучевой схеме с применением одно- и двухволнового метода измерения. Применение простейшей одно-

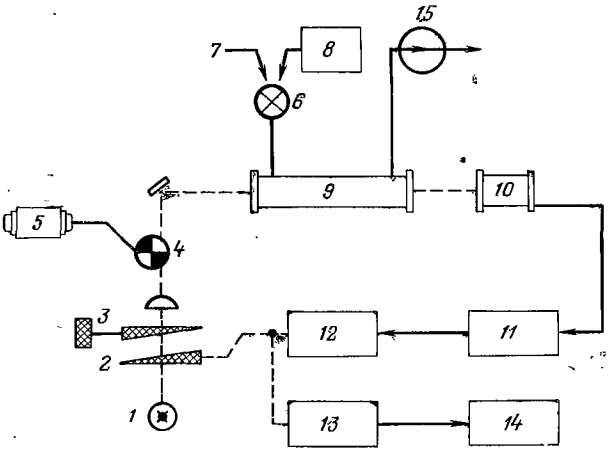


Рис. 9-4. Блок-схема автоматического инфракрасного гигрометра.

лучевой и одноволновой схемы целесообразно, например, в лабораторных приборах при наличии надежного внешнего эталона. Важнейшей разновидностью современных ИК-гигрометров являются двухволновые приборы с автоматическим уравновешиванием (рис. 9-4) [Л. 9-9].

Пучок лучей источника (лампы накаливания *1*), коллимированный плосковыпуклой линзой, модулируется с частотой 60 *гц* диском *4* с двумя фильтрами ($\lambda_{ан}$ = =2,60 *мкм* и $\lambda_{эт}$=2,45 *мкм*), вращаемым синхронным электродвигателем *5*. Измерительной камерой служит труба *9*, через которую с помощью насоса *15* и клапана *6*

пропускается исследуемый воздух *7*. Выходной сигнал детектора излучения — сернистосвинцового фоторезистора *10* (две синусоиды с частотой 60 *гц*, сдвинутые по фазе на 180°) — поступает на фазочувствительный усилитель *11*, управляющий исполнительным реверсивным электродвигателем *12*. Уравновешивающим органом служит оптический стеклянный клин *2*. При равенстве интенсивностей излучений на обеих длинах волн результирующий сигнал равен нулю. Появление сигнала рассогласования вызывает перемещение клина до полной компенсации. Клин связан через электрический преобразователь *13* с автоматическим потенциометром *14*, шкала которого градуирована в единицах абсолютной влажности воздуха. Для настройки нуля гигрометра используется второй клин *3* с ручным управлением; при этом измерительная камера заполняется сухим воздухом из осушителя *8*.

Из конструктивных особенностей других гигрометров заслуживает внимания электромагнитный вибрационный модулятор светового потока с применением одного оптического фильтра, колеблющегося с частотой 60 *гц*. Используется зависимость спектральной полосы многослойного серебряного интерференционного фильтра от угла наклона к оптической оси. Сдвиг $\lambda_{ап}=1{,}3425$ *мкм* и $\lambda_{эт}=1{,}3375$ *мкм* очень невелик, но устранение второго фильтра и вращающегося модулятора упрощает конструкцию гигрометра. Дальнейшее упрощение достигается отказом от разложения спектра излучателя и использованием оптико-акустического метода, применяемого и в других областях газового анализа. Если через газ пропускают прерывистое излучение и он содержит компонент, сильно поглощающий излучение данной длины волны, то энергия возбуждения преобразуется в тепловую и вызывает возникновение звуковых колебаний с частотой, равной частоте прерывания радиации. Интенсивность акустических колебаний измеряется обычными методами, например по давлению, создаваемому на мембрану микрофона (мембранного конденсатора). Выпускаемый в ФРГ прибор URAS [Л. 0-9] имеет измерительную камеру, через которую протекает исследуемый газ, и опорную, заполненную аммиаком, спектр поглощения которого аналогичен спектру водяного пара. Лучеприемник, состоящий из двух одинаковых частей, разделенных мембранным конденсатором и заполненных

газом, позволяет измерять разность интенсивностей излучения, прошедшего через обе камеры.

Инфракрасные гигрометры измеряют абсолютную влажность, причем характерной для малых концентраций влаги является линейная зависимость поглощения от $\sqrt{w}$ [уравнения (9-5) и (9-7)]. Основными параметрами газа, влияющими на результаты измерения, являются давление и температура, а также содержание в нем поглощающих примесей. При измерениях в приземном слое атмосферы можно пренебречь колебаниями атмосферного давления, однако измерения в верхних слоях требуют введения поправки на давление. Чувствительность инфракрасных гигрометров повышается при увеличении давления и, как у всех спектроскопических приборов, длины оптического пути. Для увеличения этой длины (без излишнего увеличения размеров прибора) применяют многоходовые кюветы, например, с многократным отражением пучка. Кроме того, измерения на очень длинных оптических путях создают возможность оценки интегрального влагосодержания земной атмосферы, определения вертикальных профилей влажности атмосферы и т. п.; при этом источником излучения служит солнечная радиация. Положительной особенностью инфракрасных гигрометров является рост чувствительности с уменьшением упругости водяного пара и связанные с этим широкие пределы измерений — от очень низких влагосодержаний до близких к насыщению.

Рассмотренные выше модели поглощения позволяют вычислить зависимость поглощения от влагосодержания; однако фигурирующие в них постоянные соответствуют лишь определенным условиям эксперимента, ввиду чего на практике градуировка инфракрасных гигрометров выполняется эмпирически.

Основной областью применения инфракрасных гигрометров до настоящего времени были метеорологические и аэрологические исследования — получение информации о влагосодержании нижних и верхних слоев атмосферы как с помощью наземных приборов, так и путем зондирования с борта самолета, стратостата в свободном пространстве и т. п.

В микрометеорологии и микроклиматологии эти приборы применялись для исследования микроструктуры

поля влажности в приземном слое атмосферы, например, для контроля процессов испарения с поверхности почвы и воды. Промышленные применения несколько ограничены сложностью и высокой стоимостью гигрометров известных типов, а также влиянием поглощающих примесей, в частности содержащихся в воздухе газов, полосы поглощения которых перекрываются с полосами водяного пара. Из известных немногочисленных применений отметим испытание упаковочных пленочных материалов на паропроницаемость, а также автоматический контроль содержания капельной влаги в потоке пара в корабельных паропроводах.

Значительно меньше используется в гигрометрии ультрафиолетовая область спектра. Известные ультрафиолетовые гигрометры основаны на поглощении водяным паром излучения с длиной волны 121,56 *нм* (линия Лайман-α-излучения атомарного водорода). Выбор длины волны обусловлен тем, что в «вакуумной» ультрафиолетовой области спектра ($\lambda < 350$ *нм*) главным фоновым газом, влияющим на результаты измерения, является молекулярный кислород; максимальная относительная разрешающая способность соответствует линии Лайман-α, на которой коэффициент поглощения водяного пара равен 387 $см^{-1}$, а кислорода — 0,3 $см^{-1}$.

Важнейшим элементом ультрафиолетового гигрометра [Л. 9-10] является источник излучения — специально разработанная газоразрядная водородная лампа, заполненная смесью водорода и инертного буферного газа (90% водорода и 10% неона или смесь водорода и аргона с примесями — менее 1% — кислорода и азота).

При надлежащем выборе давления и силы тока лампы она создает очень высокую интенсивность линии Лайман-α; однако срок службы невелик (в пределах 100 *ч*). Приемником излучения служила фотоионизационная камера, заполненная окисью азота. Источник и приемник имели окна из фтористого лития. Гигрометр построен по однолучевой схеме: ионизационная камера подключена к электрометрическому усилителю с выходным записывающим прибором. Выходной ток I усилителя уменьшается с ростом упругости e водяного пара по закону, близкому к линейному; увеличение длины оптического пути или силы тока лампы вызывает параллельное перемещение кривой $I(e)$. Это обстоятельство

было использовано для построения ультрафиолетового гигрометра с автоматическим уравновешиванием (рис. 9-5) [Л. 9-11]. Цепь обратной связи, образованная решающим усилителем, подключенным к выходу электрометрической лампы, изменяет потенциал управляющей сетки пентода, который выполняет роль уравновешивающего элемента. Изменение тока ионизационной камеры влечет за собой изменение тока через лампу; выходной прибор гигрометра подключен к выходу ре-

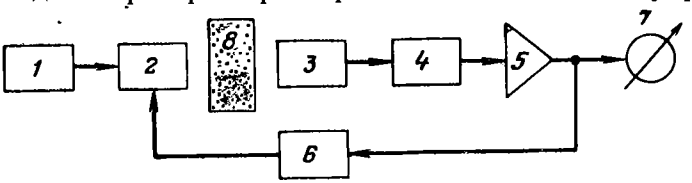


Рис. 9-5. Блок-схема автоматического ультрафиолетового гигрометра.
1 — блок питания; *2* — водородная лампа; *3* — ионизационная камера; *4* — электрометрическая лампа; *5* — операционный усилитель; *6* — пентод; *7* — показывающий прибор; *8* — исследуемый газ.

шающего усилителя. Аналогичная обратная связь используется и в схеме двухлучевого гигрометра. Ультрафиолетовые гигрометры использовались для измерений с борта самолета и в радиозондах; опыт их применения невелик.

В последнее время автором и Б. М. Бржозовским [Л. 9-12] были разработаны гигрометры с оптическим квантовым генератором — лазером. Применение источников направленного, монохроматического и когерентного излучения дает некоторые преимущества по сравнению с рассмотренными гигрометрами. Ширина спектральной линии излучения лазера меньше ширины линии поглощения H_2O; это почти полностью освобождает от влияния на показания гигрометра прерывистости спектра поглощения H_2O и уширения спектральной линии в результате взаимодействия с молекулами других компонентов газовой смеси.

Лазер должен генерировать излучение с длиной волны, соответствующей полосе поглощения водяного пара. С его помощью можно оценить: а) интегральную влажность газовой среды на оптическом пути (расстоянии от лазера до приемника), который может быть очень большим (десятки и сотни километров); б) среднюю влажность сравнительно небольшого объема газа.

В обоих случаях принцип действия гигрометра основан на зависимости коэффициента поглощения исследуемой среды от концентрации водяного пара; можно использовать также воздействие влагосодержания на фазовый сдвиг излучения, прошедшего через объект измерения.

Для решения второй из перечисленных задач была разработана установка (рис. 9-6,*а*), принцип действия которой основан на зависимости добротности оптического резонатора от коэффициента поглощения среды, заполняющей его.



Рис. 9-6. Лазерный гигрометр.
а — блок-схема; *б* — график градуировки.

Газовый лазер, генерирующий на волне 1,15 *мкм*, имеет газоразрядную трубку *2* и оптический резонатор, состоящий из зеркал *1* и *4*. Измерительная камера *3* позволяет проводить дискретный анализ образцов газа, заполняющего ее полость, или непрерывный — потока газа, проходящего через нее. Камера отделена от зеркал резонатора окнами из оптического стекла, прозрачного для излучения, защищающими поверхность зеркал от механических и химических воздействий исследуемой среды. Изменение выходной мощности, вызванное изменением добротности резонатора, воспринимается измерительным устройством, состоящим из фотоприемника *5*, выходного преобразователя *6* и показывающего прибора *7*. Градуировочная характеристика прибора — зависимость показаний N выходного прибора от абсолютной влажности воздуха a (при постоянных температуре и давлении воздуха) приведена на рис. 9-10,*б*.

Лазер был использован также в «двухпараметрическом» гигрометре для измерений интегральной влажности атмосферы на оптическом пути большой протяженности (15 и 65 *км*) [Л. 9-13]. Однако в этом случае оптическое излучение с длиной волны 0,6328 *мкм*, нечувствительное к влагосодержанию, служило для создания опорного канала, компенсирующего влияние атмосферного давления. Основной — измерительный — канал образован СВЧ-рефрактометром ($f=9{,}6$ *Гц*). Измерительное

устройство измеряет разность сдвигов фаз в обоих каналах; сигналы обоих каналов модулированы частотой 80 *кгц*.

Это один из немногочисленных примеров применения в гигрометрии «многопараметрических» методов; не подлежит сомнению, что они могут найти в измерениях влажности газов такое же разностороннее применение, как и во влагомерах (§ 5-4). Радиометрические методы применялись для измерения паросодержания пароводяных смесей (двухфазных систем) в различных элементах котельных агрегатов, паровых турбин, атомных реакторов [Л. 9-14]. Задача сводится к определению содержания жидкой (капельной) воды независимо от состояния и размеров капель без отбора пробы бесконтактным и малоинерционным способом. Показатель качества смеси — паросодержание можно характеризовать различными величинами; чаще всего его выражают объемной долей пара в смеси φ, при этом объемная доля воды равна $1-\varphi$. Влажность пароводяной смеси W можно также выразить через ее плотность ρ, если известно давление (или температура насыщения) смеси, позволяющее определить плотность сухого насыщенного пара ρ'':

$$W = \frac{\rho - \rho''}{\rho}.$$

Изменению W на 1% соответствует изменение ρ всего на $2 \cdot 10^{-5}$ *г/см*^{3}; аппаратура, измеряющая ρ, должна обладать высокой чувствительностью.

Измерения паросодержания сходны, следовательно, с измерениями плотности различных сред по методу ослабления интенсивности радиоактивных излучений. В них используют все главные типы радиоактивных излучений: гамма-, бета- и альфа-излучения, чаще всего первые два. Выбор типа излучения зависит от размеров (сечения) объекта измерения и давления смеси. Бета-излучение, обладающее значительно меньшей проникающей способностью, чем гамма-лучи, применяют при измерениях в объектах малого сечения в области низких давлений. Верхним пределом измерений с помощью бета-излучений можно считать общую массовую толщину объекта измерения, равную 1,2 *г/см*^{2}. Измерения с помощью альфа-лучей ограничены областью давлений ниже 0,5—1 *кгс/см*^{2}. Целью производственных измерений обычно является оценка средних значений паросодержания или плотности; в исследовательских работах часто возникают задачи

измерения локальных значений ρ или φ для получения картины их распределения по высоте или сечению исследуемого объекта. В первом случае объект просвечивают широким пучком гамма- или бета-лучей, во втором — узким (коллимированным) пучком.

Альфа-лучи (изотоп Pu^{239}) были применены в измерительной установке для давлений начиная с 0,03—0,05 *кгс/см*^{2} [Л. 9-15]. Использовались два метода измерения — по ослаблению интенсивности излучения и компенсационный. Во втором методе расстояние между излучателем и детекторами заполнено тремя слоями постоянной толщины—исследуемой пароводяной смеси, компенсирующей среды (воздух, гелий, аргон) и разделяющей их алюминиевой перегородки. Интенсивность альфа-излучения, падающего на детектор, поддерживают постоянной, изменяя давление или плотность компенсирующей среды; изменение этих параметров характеризует паросодержание смеси.

9-3. ГИГРОМЕТРЫ, ОСНОВАННЫЕ НА ДРУГИХ ФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВАХ ГАЗОВ

Гигрометры на принципе теплопроводности основаны на разнице между теплопроводностью сухих газов (воздуха) и теплопроводностью водяного пара. Принцип этот применим в основном к влажным газам, содержащим только указанные два компонента. Измерение влагосодержания более сложных газовых смесей возможно, если все компоненты смеси (кроме водяного пара) имеют значения теплопроводности, очень близкие по величине, или если их концентрации постоянны. Измерение выполняется с помощью электрических газоанализаторов по теплопроводности, у которых чувствительным элементом служит нагреваемая электрическим током металлическая проволока (иногда термистор), выполняющая одновременно роль источника тепла и температурного датчика. Тепловое равновесие проволоки в камере, через которую протекает исследуемая газовая смесь, определяется (при условии постоянства притока тепла и минимизации потерь конвективных, радиационных и за счет теплопроводности чувствительного элемента) главным образом теплопроводностью газа. В этих условиях величина сопротивления чувствительного элемента несет информацию о влажности газа. Важнейшим фактором, влияющим на результат измерения, помимо состава газа, является его скорость, которую необходимо стабилизировать. Влияние скорости газа устраняется в датчиках диффузионного или конвективного типа, однако при этом сильно увеличивается инерционность датчика.

Теплопроводность воздуха при 0 °С $\lambda_в = 2{,}38 \cdot 10^{-2}$ *вт/(м · град)*, ее температурный коэффициент для температур от 0 до 100 °С равен $A_в = 0{,}00253$.

Для водяного пара при 100 °С относительная теплопроводность (по отношению к воздуху) составляет $\lambda/\lambda_в=0{,}973$, температурный коэффициент $A=0{,}00455$.

Имеющиеся данные для других распространенных газов показывают, что их относительная теплопроводность изменяется в широких пределах — от 0,285 для сернистого углерода до 7,130 для водорода (значения $\lambda/\lambda_в$ указаны при 0 °С). Зависимость теплопроводности от температуры можно считать линейной:

$$\lambda=\lambda_0(1+A\Delta t),$$

где λ и λ_0 — теплопроводность сухого газа при температурах t и t_0, $\Delta t=t-t_0$.

Температурный коэффициент A распространенных газов находится в пределах приблизительно от $260\cdot10^{-5}$ (азот, водород, окись углерода) до $980\cdot10^{-5}$ (пары бензина).

Зависимость теплопроводности воздуха и других газовых смесей от их влагосодержания не подчиняется простому аддитивному закону, и ее нельзя вычислить по значениям теплопроводности водяного пара и других компонентов смеси. В широком диапазоне влагосодержаний эта зависимость немонотонна и имеет максимум. Следствием этого является необходимость эмпирической градуировки гигрометров по теплопроводности и ограничения их верхнего предела измерений. Для влагосодержаний воздуха больше 12% (при атмосферном давлении для температур точки росы $\tau>50$ °С) метод теплопроводности нельзя применять по причине недостаточной чувствительности или неоднозначности измерений. Нижний предел измерения также ограничен понижением чувствительности — для воздуха значением $\tau\approx-40$ °С.

Гигрометры по теплопроводности (как и газоанализаторы этого типа) имеют измерительные устройства, построенные по мостовой схеме. В них используются датчики с измерительными камерами проточного типа и опорными, заполненными образцовым газом, например насыщенным. Для компенсации влияния колебаний состава исследуемого газа опорную камеру выполняют также проточной, непрерывно заполняя ее исследуемым газом, доведенным до состояния насыщения. Для получения максимальной чувствительности измерительной схемы в четырехплечем мосте

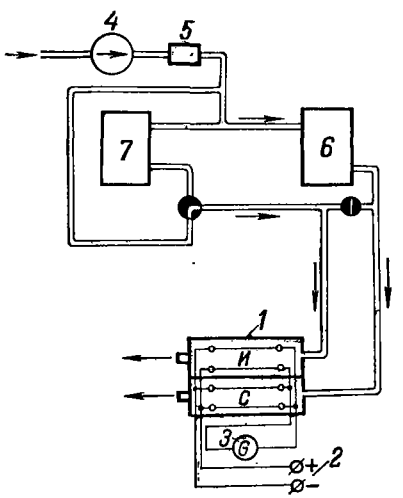


Рис. 9-7. Блок-схема гигрометра по теплопроводности воздуха.

1 — датчик с камерами измерительной *И* и опорной *С*; *2* — источник питания; *3* — показывающий прибор; *4* — мембранный насос; *5* — фильтр; *6* — насыщающий увлажнитель; *7* — осушитель.

в два плеча вводят измерительные сопротивления, а в два остальных — опорные. На этих принципах построена схема автоматического гигрометра (рис. 9-7).

Настройка гигрометра по двум крайним точкам его шкалы (при подаче воздуха с $\varphi=100\%$ в камеры $И$ и $С$ и воздуха с $\varphi=0$ в камеру $И$) позволяет получить единую градуировку для воздуха и других газов. Шкалу гигрометра по теплопроводности можно градуировать в различных единицах, причем необходимость введения поправки на параметры (давление p и температура t) исследуемого газа определяется выбором единицы измерения.

В [Л. 9-16] описан гигрометр, имеющий шкалу, градуированную непосредственно в процентах относительной влажности. Измерительное устройство состоит из двух одинаковых мостов; в каждый из них включены проточная и опорная камеры. Проточная камера измерительного моста обтекается исследуемым газом, через камеру опорного моста непрерывно пропускают этот же газ, доведенный до насыщения при температуре исследуемого газа. Сигналом, характеризующим относительную влажность, служит отношение выходных напряжений обоих мостов.

Гигрометры по теплопроводности применимы в широком диапазоне влагосодержаний и температур газа (от низких отрицательных до 200 °С и выше) и позволяют автоматизировать измерения влажности; они отличаются достаточно высокими быстродействием и надежностью. Их недостатками являются громоздкость аппаратуры, обусловленная введением увлажнителей и осушителей, и, самое главное, возможность дополнительных погрешностей при появлении в газовой смеси примесей, отличающихся по своей теплопроводности. Для возникновения погрешности, равной 0,1% объемного влагосодержания, достаточно изменения концентрации водорода на 0,005%, метана на 0,04%, двуокиси углерода, этилового и метилового спиртов на 0,2%. По указанным причинам метод теплопроводности не нашел широкого распространения.

Сорбционно-термические гигрометры основаны на повышении температуры жидких или твердых сорбентов в результате сорбции влаги из окружающей газовой среды. Процесс адсорбции влаги такими материалами является экзотермическим; обратный эффект — охлаждение гигроскопического материала — наблюдается при десорбции влаги. Количество выделенного тепла зависит от природы и количества сорбента, его влагосодержания в момент начала сорбции, количества адсорбированной влаги, ее фазы (жидкой или газообразной) и от температуры. В первом приближении можно считать, что у материалов такого рода интегральная теплота сорбции растет линейно с увеличением влагосодержания материала.

В результате поглощения влаги температура сорбента повышается до некоторого максимального значения, после чего происходит ее понижение до температуры окружающей среды. Эмпирическая формула описывает (весьма приблизительно) этот процесс линейной зависимостью

$$\Delta t_c = ka,$$

где Δt_c — максимальное приращение температуры сорбента; a — абсолютная влажность воздуха; k — постоянный коэффициент.

Из жидких сорбентов в гигрометрах рассматриваемого типа применялась главным образом серная кислота. Известен такой прибор промышленного типа, выпускаемый в ФРГ под названием «Термофлюкс» [Л. 0-9].

Более распространены гигрометры с твердыми сорбентами; первоначально применялись абсолютно сухие гигроскопические материалы — отбеленный хлопок, целлюлоза, папиросная бумага. В последующем сорбентами служили силикагель, алюмогель, пятиокись фосфора и в последнее время цеолиты.

Простейший чувствительный элемент представляет собой термоэлектрическую цепь с двумя спаями: покрытым гигроскопическим материалом и оголенным. Первый спай попеременно подвергается воздействию осушенного и исследуемого воздуха. Разность термоэ. д. с., измеряемая прибором, включенным в термоэлектрическую цепь, характеризует влажность воздуха.

В автоматическом гигрометре, разработанном в США, исследуемый поток газа разделяется с помощью регуляторов расхода на две равные части, одна из которых полностью осушается в регенеративной адсорбционной колонне (адсорбере). Потоки сухого и влажного газа поступают в две половины измерительной камеры датчика. Реле времени с помощью трехходовых кранов автоматически переключают газовые потоки через промежутки, достаточные (при данной скорости газа) для достижения гигротермического равновесия между газом и сорбентом в колоине. Таким образом, при полной длительности цикла, равной 4 *мин*, каждый из газовых потоков подвергается сушке в течение 2 *мин*. В датчике установлена дифференциальная термобатарея со спаями термопар, покрытыми твердым сорбентом. Одна серия спаев омывается сухим газом, вторая — влажным;



Рис. 9-8. Датчик автоматического гигрометра сорбционно-термического типа.

так как процессы сорбции и десорбции происходят в датчике одновременно, результирующая термо- э. д. с. равна сумме максимальных абсолютных значений э. д. с., развиваемых в течение обоих полуциклов и имеющих противоположные знаки. Прибор записывает знакопеременные импульсные сигналы, длительность каждого из которых соответствует одному полуциклу измерения. При этом середина шкалы самописца соответствует нулевому значению влажности. Для получения более удобной, непрерывной записи и напряжения одного знака, а также с целью использования прибора для регулирования влажности был применен пиковый вольтметр (импульсметр). В последующем длительность цикла была уменьшена до 3 *мин*, а в датчике применяли два остеклованных миниатюрных термистора [Л. 9-17]. Датчик (рис. 9-8) содержит два слоя сорбента *7* с сетчатыми экранами *6*; в каждый из слоев погружены два термистора *4*. В первой половине цикла влажный газ поступает по каналу *1* через отверстие *3* и после прохождения через слой сорбента выходит через отверстие *5*. Осушенный газ (канал *2*) проходит через отверстие *8*, сорбент и отверстие *5*. Во втором полуцикле канал *1* играет роль «сухого», а канал *2* — «влажного». Четыре термистора включены в плечи моста с выходным автоматическим потенциометром.

Гигрометр имеет пределы измерений от 0—10 до 0—1 000 м. д., причем шкала линейна для влагосодержаний до 500 м. д. Постоянная времени датчика превышает 4 *мин.* Существенное упрощение описанного прибора [Л. 9-18] заключается в использовании одного газового потока и совмещении адсорбера с датчиком. Стабилизированный по расходу поток газа *1* (рис. 9-9) с помощью автоматически управляемых трехходового крана *2* и двух выпускных клапанов *7* периодически реверсируется и поступает попеременно на вход и выход цилиндрической колонки *4*, заполненной твердым сорбентом. С помощью дифференциальной термобатареи *5* и прибора *6* измеряют разность температур противоположных поверхностей слоя сорбента. Температура газа стабилизируется в теплообменниках *3* до поступления в колонку. Измерение разности температур на входе и выходе слоя сорбента использовали также для автоматического контроля степени увлажнения твердых сорбентов в регенеративных адсорберах для осушки газов.

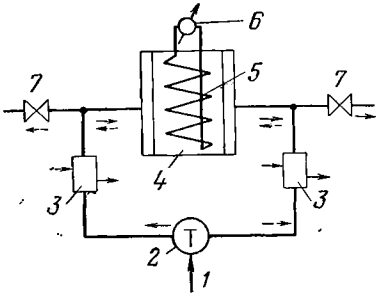


Рис. 9-9. Блок-схема автоматического сорбционно-термического гигрометра.

Основной областью применения сорбционно-термических гигрометров является измерение очень малых влагосодержаний. Их свойства в значительной степени определяются применяемыми сорбентами; оптимальными являются молекулярные сита (цеолиты). При наличии в газе компонентов, полимеризующихся при температуре регенерации цеолита, приходится прибегать к другим сорбентам. Некоторая громоздкость приборов и неудобства, связанные с необходимостью осушки газа и регенерации сорбента, имеют следствием то, что на практике сорбционно-термические гигрометры применяются редко, уступая место гигрометрам других типов, в первую очередь кулонометрическим.

Конденсационные (сгустительные) гигрометры основаны на конденсации водяного пара при искусственном охлаждении влажного газа и измерении количества конденсата, образовавшегося при прохождении известного количества газа через холодильник. Для охлаждения газа нашли практическое применение простейшие способы — пропускание газа через трубку, помещенную в ванну со льдом, или чаще всего (при измерениях влажности газов с высокой температурой) через холодильник, имеющий водяную рубашку с циркуляцией водопроводной воды.

Измерение малых и очень малых влагосодержаний возможно при глубоком охлаждении анализируемого газа. Так, например, для контроля влагосодержания хладоагента холодильных машин применяли сжиженный кислород. В современных гигрометрах этого типа для измерения количеств газа и конденсата используются электрические датчики и электронные приборы; весь процесс измерения выполняется автоматически.

Схема автоматического конденсационного гигрометра представлена на рис. 9-10. Исследуемый газ через клапан *1* с электромагнит-

ным приводом поступает в систему, находящуюся под разрежением, которое создает воздушный насос *2*. При протекании газа через холодильник *3* влага конденсируется, конденсат стекает в мерный сосуд *4*, а газ проходит через газовый счетчик *5*, снабженный приборами, измеряющими на выходе из счетчика параметры газа — температуру *6* и разрежение *7*. Клапан *8* позволяет регулировать расход газа. В мерном сосуде установлев датчик *9*, присоединенный к вторичному прибору *10*, измеряющему массу или объем конденсата. Датчик может быть поплавкового типа; предпочтительно применение электрических датчиков уровня (емкостных, тензометрических), не имеющих подвижных частей. Принцип измерения — дискретный; газ

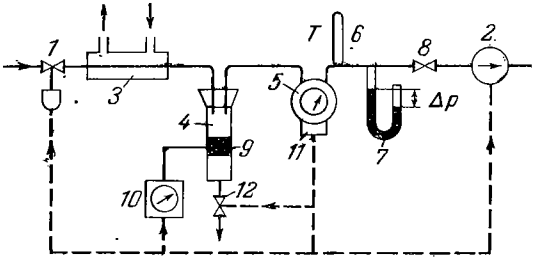


Рис. 9-10. Блок-схема автоматического конденсационного (сгустительного) гигрометра.
— — — — каналы автоматического управления.

пропускается через систему в течение заранее установленного времени или в заранее установленном количестве. Сигнал об окончании цикла измерения дает управляющее устройство *11* (реле времени или контактное устройство газового счетчика). Управляющее устройство закрывает клапан *1*, останавливает насос *2* и фиксирует стрелку прибора *10* в неподвижном состоянии для отсчета или записи. После спуска конденсата при помощи клапана *12* можно возобновить измерение. Необходимым условием является герметичность всего тракта прохождения газа.

Статическая характеристика гигрометра описывается уравнением [Л. 0-1]:

$$x_0 = \frac{E_T}{p - E_T} + \frac{V_к}{V_и} \frac{760}{p - E_T} \frac{T}{273},$$

где x_0 — объемное влагосодержание исследуемого газа; T — температура охлаждения газа, °К; E_T — упругость насыщенного водяного пара при температуре T; p — давление газа в системе, равное разности атмосферного давления и разрежения Δp (рис. 9-10); $V_к$, $V_и$ — измеренные объемы конденсата и газа.

Результат измерения влажности определяется не только отношением количества конденсата в мерном сосуде к количеству газа, но также и температурой охлаждения (величины T и E_T) и в меньшей степени давлением газа в системе. Температуру и давление газа необходимо поддерживать постоянными или вводить соответствующие поправки в результат измерения. Точность измерения повышается с увеличением количества конденсата, т. е. при увеличении объема

газа и повышении его влагосодержания; конденсационный метод обычно применяют при $x_0 \geqslant 0{,}1$. В современных гигрометрах рассматриваемого типа расход газа стабилизируют или измеряют количество газа с помощью расходомеров (электронных с сужающими устройствами, ротаметров), снабженных интеграторами.

Минимальная длительность одного цикла измерения при заданных значениях максимальной влажности, расхода газа и допустимой погрешности определяется глубиной охлаждения. При охлаждении водопроводной водой длительность цикла может быть понижена лишь до нескольких минут, что исключает применение гигрометров в процессах, протекающих с большой скоростью.

Основная область применения конденсационных гигрометров — измерение абсолютной влажности газов при высоких температурах. При этом положительным свойством метода является то, что газовые примеси, не конденсирующиеся при температуре охлаждения, не влияют на результаты измерения.

В автоматическом гигрометре [Л. 9-19] для газов подземной газификации и других агрессивных парогазовых смесей с температурой до 250 °С и избыточным давлением до 1 *кгс/см*^{2} предусмотрено охлаждение потоком воздуха, создаваемым вентилятором. Уровень сконденсированной влаги измеряется поплавком с индукционным преобразователем, а расход газа стабилизируется регулятором прямого действия. Влияние температуры компенсируется автоматическим термокомпенсатором. Длительность цикла измерения составляет для абсолютной влажности a в пределах от 150 до 400 *г/м*^{3} (объем в нормальных условиях) 15 *мин*, для $300 \leqslant a \leqslant 1\,000$ *г/м*^{3} — 5 *мин*.

Диффузионные гигрометры в простейшем виде состоят из измерительной камеры с полупроницаемой перегородкой или мембраной из твердого пористого материала, отделяющей камеру от внешней газовой среды, но пропускающей водяной пар. Во внутренней полости камеры находится материал, сорбирующий или десорбирующий влагу и создающий в камере постоянную упругость водяных паров. При диффузии газа через пористую перегородку на ней создается разность давлений, установившаяся величина которой фуикционально связана с влажностью внешнего газа. Измеряя величину перепада давления с помощью дифференциального манометра, можно получить информацию о влажности газа и ее изменениях.

В качестве материала для изготовления диффузионной перегородки использовались определенные сорта глины (керамика) или угля, гипс, микропористый эбонит, мембраны из целлюлозы, желатина и др. Осушителями служили серная кислота (в первых диффузионных гигрометрах), высушенный алюмогель или силикагель, хлористый литий, увлажнителем — хлопчатобумажная ткань (фланель, марля) или вата, пропитанные дистиллированной водой.

Основной характеристикой прибора является линейная зависимость измеряемого перепада давления Δp от значения упругости e водяного пара исследуемого газа.

При применении измерительной камеры с осушителем эта зависимость имеет вид:

$$\Delta p_c = k_c (e - e_0), \qquad (9\text{-}8)$$

где k_c — постоянная прибора с осушителем; e_0 — упругость водяного пара над поверхностью осушителя.

В тех случаях, когда используются высокоэффективные сорбенты влаги, значение e_0 близко к нулю и можно принять:

$$\Delta p_c = k_c e. \tag{9-9}$$

При применении увлажнителя, насыщающего воздух в измерительной камере, имеет место соотношение

$$\Delta p_в = k_в (E - e), \tag{9-10}$$

где $k_в$ — постоянная прибора с увлажнителем; E — упругость насыщенного пара при температуре измерения (упругость пара над поверхностью увлажнителя).

Согласно теории [Л. 9-20], основанной на законе диффузии Фика, для диффузионного гигрометра с насыщающим увлажнителем имеет место соотношение

$$E - e = \left(1 + \alpha \frac{h_0}{h}\right) \frac{\varkappa}{\alpha} \frac{p - e}{D\mu} \Delta p, \tag{9-11}$$

где α — коэффициент, зависящий от пористости перегородки; $\varkappa$ — коэффициент фильтрации воздуха через перегородку; D — коэффициент диффузии; μ — коэффициент внутреннего трения воздуха; h, h_0 — толщина перегородки и ее расстояние от поверхности увлажнителя; p — атмосферное давление воздуха.

Из (9-11) следует, что постоянная прибора зависит не только от свойств (пористости и других) и размеров (толщина и расположение относительно сорбента или десорбента) мембраны, но и от полного давления исследуемого газа, его состава и температуры (произведение $D\mu$).

Выполняя измерение с двумя одинаковыми камерами с идентичными мембранами, причем одна из камер снабжена увлажнителем, а вторая — осушителем, можно непосредственно определить относительную влажность φ. Действительно, на основании (9-9) и (9-10) и принимая $k_c = k_в$, получаем:

$$\frac{\Delta p_c}{\Delta p_c + \Delta p_в} = \frac{e}{E} = \varphi.$$

Если принимать во внимание остаточную влажность в измерительной камере с осушителем, т. е. использовать уравнения (9-8) и (9-10), получим уравнение

$$\frac{\Delta p_c}{\Delta p_c + \Delta p_в} = \frac{\varphi - \varphi_0}{1 - \varphi_0},$$

где $\varphi_0 = e_0/E$ — остаточная относительная влажность внутри камеры с осушителем.

Принцип устройства диффузионного двухкамерного гигрометра был предложен Грейнахером [Л. 9-21] и использован в приборах, предназначенных для измерения влажности атмосферного воздуха, т. е. для условий, когда давление газа мало меняется в процессе измерения.

В других диффузионных гигрометрах нашли применение три камеры — с осушителем, с увлажнителем и компенсационная. Последняя камера служит для уменьшения погрешности, связанной

с колебаниями полного давления газа (атмосферного давления воздуха), имеет такие же размеры и перегородку, как измерительные камеры, и присоединяется к свободному концу дифференциального манометра; в компенсационной камере отсутствуют как осушитель, так и увлажнитель. Для измерения абсолютной влажности применяются и двухкамерные гигрометры, имеющие измерительную камеру с осушителем и компенсационную.

Абсолютная погрешность определения относительной влажности φ диффузионным гигрометром с применением осушителя уменьшается с понижением φ; может быть достигнута относительно высокая точность при измерении малых значений φ. В то же время точность и чувствительность измерения уменьшаются с понижением температуры газа, в связи с чем диффузионный метод применяется в основном при положительных температурах.

ЧАСТЬ ТРЕТЬЯ

ОБЩИЕ ВОПРОСЫ ИЗМЕРЕНИЙ ВЛАЖНОСТИ

Глава десятая

МЕТОДЫ И ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА, ОБЩИЕ ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ АГРЕГАТНЫХ СОСТОЯНИЙ ТЕЛА

10-1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ. МАССОПЕРЕНОСНЫЕ МЕТОДЫ

До настоящего времени принято рассматривать измерения влагосодержания твердых материалов (и жидкостей) и газов как отдельные, независимые области техники. Такое разграничение не всегда целесообразно. Во многих процессах в самых различных областях измерения влажности твердых материалов и газов переплетаются теснейшим образом; оба вида измерений необходимы для управления процессом или получения полной информации о его протекании.

Более того, для измерения влажности твердых тел, жидкостей и газов используются некоторые одинаковые или аналогичные методы, основанные на измерении параметров исследуемого объекта: диэлькометрический (включая метод СВЧ), инфракрасный, некоторые радиометрические.

Логическим следствием общности и сближения методов измерения влажности твердых материалов, жидкостей и газов должно являться создание универсальных методов и средств измерения, пригодных при всех агрегатных состояниях вещества. Это способствовало бы в области измерений влажности решению одной из центральных задач современной измерительной техники — унификации методов и средств измерения, а также их испытаний, градуировки и оценки.

Наметились два возможных решения этой задачи. Первое заключается в использовании перечисленных выше методов (например, диэлькометрического), основанных на измерении одних и тех же

физических параметров твердых материалов, жидкостей и газов, и создании приборов, совмещающих функции влагомера и гигрометра, имеющих общее измерительное устройство с набором датчиков для различных агрегатных состояний объектов измерения. Другим возможным путем является использование массопереносных методов (см. § 1-3 и 6-2), основанных на переносе влаги из объекта измерения во вспомогательную среду и измерении физических параметров этой среды. Недостатком массопереносных методов является их инерционность. В то же время они обладают и некоторыми достоинствами.

При применении массообменных методов можно устранить или существенно ослабить влияние таких возмущающих факторов, как распределение влаги и форма ее связи с сухим веществом, температура, плотность, химический и гранулометрический состав твердых материалов, давление, температура, скорость газов. В последние десятилетия были разработаны модификации этих методов, пригодные для автоматического контроля влажности, причем значительное внимание уделялось повышению их быстродействия. Важнейшими являются равновесные методы (§ 10-2). В этом параграфе рассмотрены остальные массопереносные методы, имеющие преимущественно лабораторный характер.

Экстракционные методы основаны на извлечении влаги из образца твердого материала или из газа жидкостью и оценке физико-химических свойств экстракта, связанных с его влагосодержанием.

Основной областью применения этих методов является измерение влажности твердых тел. При этом измеряемыми величинами могут являться плотность, температура кипения, оптические и другие характеристики экстракта.

Наибольшее практическое значение имеют электрические (кондуктометрический и диэлькометрический) методы измерения параметров экстракта, упрощающие аппаратуру и сокращающие длительность измерения. Экстрагирующий агент должен удовлетворять ряду требований. Он должен полностью извлекать из твердого вещества воду, не поглощая других компонентов. Длительность экстракции должна быть минимальной. Используемые свойства экстрагента должны быть удобны для измерения и согласованы со свойствами анализируемого материала.

Полное извлечение влаги достигается легче всего у тонко измельченных материалов. Равновесие между анализируемым материалом и экстрагентом наступает при равенстве химических потенциалов систем вода — сухое вещество и вода — экстрагент. Следовательно, оптимальный экстрагент для данного материала следует выбирать с учетом величин химических потенциалов воды в материале и экстрагенте. Практически в большинстве случаев выбор экстрагента и градуировку влагомера осуществляют эмпирически.

В экстракционно-кондуктометрическом методе применяют преимущественно органические растворители с низкой удельной проводимостью. Иногда для повышения чувствительности измерения к экстрагирующей жидкости добавляют соли в избытке; вода увеличивает растворимость электролита в жидкой фазе, а следовательно, и проводимость экстракта. Такой метод применялся для измерения влажности почв, некоторых солей и ряда других материалов.

Экстракционный диэлькометрический метод с измерением ε экстракта применялся к ряду дисперсных, порошкообразных и пасто-

образных материалов, в частности к пищевым, молочным и мясным продуктам. В качестве экстрагирующей жидкости наибольшее применение нашел диоксан, имеющий низкую ε и смешивающийся с водой в любом соотношении (см. § 3-1). Применялся также диоксан с добавкой этиленгликоля («элуол») или веществ, реагирующих с поглощенной влагой, например уксусного ангидрида.

Заслуживает внимания экстрагирование влаги из солей NaCl и NH_4NO_3 растворами диоксана и метанола с последующим измерением характеристик экстракта в емкостном датчике с наружными электродами при частоте 9,45 *Мгц*. Извлечение влаги из образцов солей в этом случае продолжалось всего 5 *мин* (при интенсивном перемешивании).

Предельной разновидностью экстракционного метода является метод растворения, в котором измеряют параметры растворителя после полного растворения образца твердого материала. Этот способ применялся лишь в отдельных случаях, например для измерения влажности (20—30%) нитроцеллюлозы. Навеска материала растворялась в безводном ацетоне с последующим спектрофотометрическим определением влагосодержания по полосе поглощения $\lambda = 1{,}92$ *мкм* [Л. 10-1].

Датчик экстракционного влагомера представляет собой сочетание устройства для измельчения образца материала и извлечения из него влаги с измерительной ячейкой, конструкция которой определяется принятым методом измерения параметров экстракта. Конструкция датчика влагомера [Л. 10-2], основанного на извлечении влаги спиртом, предусматривает автоматизацию подачи образца сыпучего материала и слива экстракта с помощью заслонки и клапана с электромагнитным приводом. Длительность перемешивания и измельчения образца в процессе экстрагирования также выдерживается автоматически.

Основной недостаток экстракционных методов заключается в необходимости использования реактивов, от чистоты и правильности дозирования которых зависит точность измерения. Метод лишен одного из основных достоинств электрических методов измерения влажности — быстроты. Длительность одного измерения экстракционным методом достигает 2 *ч*. Экстракционные методы несвободны от некоторых погрешностей, присущих и другим методам. Известно, например, что при высушивании коллоидных капиллярнопористых материалов почти невозможно полностью удалить последние проценты или доли процента влаги. Это же явление наблюдается и при экстрагировании влаги.

Указанные причины, а также громоздкость измерения ограничивают распространение экстракционных электрических методов. Их применение представляет интерес лишь в отдельных случаях, когда другие, более простые методы неприменимы.

Иммерсионный метод (метод погружения) применялся для измерения влагосодержания порошков по их диэлектрической проницаемости ε; как и экстракционный метод, он требует применения вспомогательной жидкости. В основе лежит следующий принцип: если в рабочее пространство конденсатора, заполненного жидкостью, ввести твердое тело любой формы, имеющее такую же диэлектрическую проницаемость, как и жидкость, емкость конденсатора не изменяется. В конденсаторном датчике с расширением в верхней нерабочей части для приема жидкости, вытесненной порошком, можно добиться равенства значений ε порошка и жидкости различными

способами [Л. 3-2]. Один из них основан на выборе жидкости из серии смесей (например, диоксан — вода) с различными значениями ε. Другой способ заключается в изменении состава бинарной смеси жидкостей (например, бензол и нитробензол или четыреххлористый углерод и нитробензол) путем добавления малых порций одного из компонентов до тех пор, пока введение постоянной навески порошка не перестанет изменять ε смеси. Достижение равенства диэлектрических проницаемостей порошка и жидкости отмечают по изменению знака разности показаний диэлькометра с порошком и без него. Известно также применение датчика, состоящего из двух расположенных друг над другом цилиндрических конденсаторов одинаковой емкости, которые можно подключать к одному измерительному устройству. В нижнюю часть датчика загружают порошок и оба конденсатора заполняют жидкостью с малой диэлектрической проницаемостью, к которой постепенно добавляют жидкость с высокой ε до достижения равенства емкостей верхнего и нижнего конденсаторов.

Все известные методики измерения весьма громоздки; кроме того, метод погружения неприменим, если порошок поглощает один из компонентов жидкой смеси, изменяя значение ε, а также если жидкость растворяет порошок или изменяет его свойства. В связи с этими недостатками иммерсионный метод нашел крайне ограниченное применение.

Метод газовой хроматографии применим для аналитического определения влагосодержания газов, жидкостей и твердых материалов. В газожидкостной хроматографии в качестве адсорбента (неподвижной фазы) используется жидкость, покрывающая тонким слоем твердый субстрат. Если анализируемым веществом является жидкость или твердое тело, влага до поступления в колонку хроматографа испаряется и в парообразном состоянии переводится в поток сухого малосорбируемого газа — носителя. Метод по своим принципиальным основам является массообменным; кроме того, в ряде случаев его используют в сочетании с другими массообменными методами.

Для измерения влажности воздуха методом газожидкостной хроматографии он вводится в адсорбционную колонку, которая по окончании адсорбции промывается потоком гелия. С помощью детектора по теплопроводности получают на хроматограмме пики поглощения воздуха и воды; по высоте пика воды можно измерять низкие влагосодержания. При применении в качестве наполнителя колонки фтороуглеродного субстрата (флюоропак), покрытого пленкой полиэтиленгликоля, нижний предел измеряемого влагосодержания составлял 50 м. д. при объеме образца 1 $см^3$ и 1—5 м. д. при увеличении его объема до 10 $см^3$ [Л. 10-3]. В [Л. 10-4] предлагается характеризовать влагосодержание отношением площади пика воды к площади пика воздуха. Эта величина не зависит от расхода газа носителя, одинаково влияющего на пики обоих компонентов; объем исследуемого образца воздуха необходимо, однако, стабилизировать. Имеется также некоторый опыт хроматографических измерений влагосодержания различных органических жидкостей. Для нефтей и нефтепродуктов была разработана методика прямого определения влаги в продукте, состоящем из многих углеводородов, путем разделения на двух колонках с полуобратной продувкой [Л. 10-5а]. Предлагалось также использовать в качестве твердого носителя фторопласт-4 и в качестве жидкой фазы — силоксановые полимеры.

[Л. 10-5б]. При этом благодаря гидрофобности наполнителя и жидкого адсорбента получают узкий пик воды в начале хроматограммы, непосредственно после пика воздуха.

Затруднения, связанные с количественным определением влаги (особенно при низких влагосодержаниях) в органических соединениях вследствие несимметричности и большой ширины пика воды, привели к созданию методик, в которых хроматографический метод комбинируется с другими массообменными методами. Для жидких углеводородов применяли некоторые химические методы (см. § 1-3): для бутадиена — карбидный, для нефти — гидридкальциевый. Количество газа, образующегося при реакции влаги с карбидом или гидридом кальция (соответственно ацетилена или водорода), определяют хроматографом; результаты этого анализа косвенно характеризуют влагосодержание жидкости. Комбинированные методы применяли также для твердых материалов. Так, например, для измерения влажности зерна применялся хроматографический метод в сочетании с экстракционным [Л. 10-6]. Влага извлекалась из зерна, как и в методе К. Фишера, безводным метанолом, а экстракт анализировали методом газожидкостной хроматографии.

Несомненный интерес представляют прямые хроматографические измерения очень низких влагосодержаний твердых материалов, например влагосодержаний ниже 0,3% некоторых полимеров (поливинилхлорид, полипропилен) в порошкообразном виде [Л. 10-7]. Влага испаряется с поверхности частиц тонко измельченного гидрофобного полимера в результате нагрева до высокой температуры (110—145 °С) и в смеси с газом носителем (гелий или водород) поступает в колонку хроматографа, термостатируемую при 100 °С. На хроматограмме получают раздельные пики воздуха, летучих веществ и воды. Был разработан автоматический анализатор, в котором все измерительные операции, начиная с отбора пробы до очистки пробоотборника по окончании измерений, выполняются автоматически по программе, задаваемой с помощью командного прибора и значительно сокращающей длительность цикла измерения по сравнению с лабораторным анализом. Хроматографические методы позволяют измерять влажность (в том числе очень малые влагосодержания) с высокой точностью. К их недостаткам относятся сложность и высокая стоимость аппаратуры, а также значительная длительность анализа.

Масс-спектрометрический метод при применении к сложным смесям углеводородов и, в частности, к жидким и газообразным высокомолекулярным соединениям позволяет наряду с другими компонентами определять их влагосодержание в широких пределах с высокой точностью, причем величина образца может быть весьма малой (для жидкостей несколько микролитров). Так, например, определяли влагосодержание жидкой смеси метанола, этанола и метилэтилового кетона [Л. 10-8]. Длительность одного анализа не превышает 1—2 *ч*. Процесс анализа может быть автоматизирован; автоматические масс-спектрометры были использованы для непрерывного контроля содержания водяных паров в отходящих газах мартеновских печей.

Ввиду сложности и высокой стоимости масс-спектрометрической аппаратуры ее применение для измерения влажности оправдано лишь в отдельных случаях анализа сложных смесей, когда, кроме влаги, необходимо определить содержание и других компонентов, трудно поддающихся анализу.

К массообменным можно отнести также калориметрический метод измерения малых влагосодержаний (0,3—2%) порошкообразных материалов [Л. 10-9]. В процессе десорбции влаги тонкого слоя материала, находящегося в замкнутом объеме, подвергнутом вакуумированию, происходит резкое понижение температуры материала. Максимальное понижение температуры (на практике 3—4 °С) характеризует исходное влагосодержание образца.

Калориметрический метод был реализован с помощью дифференциального датчика, имеющего два чувствительных элемента с исследуемым и абсолютно сухим образцами материала. С помощью термометров сопротивления и мостовой схемы измеряли максимальную разность их температур в процессе сброса давления в датчике.

10-2. ГИГРО- И ГИДРОТЕРМИЧЕСКИЙ РАВНОВЕСНЫЕ МЕТОДЫ

Равновесные методы основаны на измерении электрических или других физических параметров влагочувствительного элемента датчика, находящегося в гигро- или гидротермическом равновесии с исследуемым твердым или жидким материалом. Замена прямого измерения параметров материала измерением свойств вспомогательного тела устраняет или уменьшает погрешности, связанные с физическими и химическими характеристиками материала. Влагочувствительный элемент датчика выбирается заранее; его состав постоянен, и зависимость электрических свойств от влажности более однозначна, чем у обычных влажных материалов.

В зависимости от характера влагообмена между контролируемым материалом и датчиком возможны следующие два метода измерения:

1. Измерение с использованием промежуточной воздушной (или другой газовой) среды между материалом и датчиком, основанное на гигротермическом равновесии материала с окружающим воздухом и воздуха с чувствительным элементом датчика. В этом методе влага материала переводится в парообразное состояние, пар переходит в окружающую среду и поглощается чувствительным элементом датчика; перенос влаги может происходить и в обратном направлении. Таким образом, газ служит промежуточным носителем влаги, изменяющей свое агрегатное состояние.

2. Измерение при наличии прямого (контактного) влагообмена между материалом и датчиком, т. е. перемещения влаги из одного тела в другое без изменения ее агрегатного состояния.

Первый метод будем называть методом гигротермического равновесия, второй — методом контактного влагообмена или гидротермического равновесия. Различие физических процессов, используемых в обоих методах, влечет за собой коренное различие характеристик:

1. Гигротермический метод применим только в пределах до максимального гигроскопического влагосодержания $u_{г.м}$ контролируемого материала, т. е. для измерения влагосодержания $u \leqslant u_{г.м}$. При контактном влагообмене можно измерять значительно более высокую влажность — в принципе до максимальной влажности намокания одного из соприкасающихся тел.

2. В гигротермическом методе датчик не соприкасается с контролируемым материалом, в то время как для измерения по гидротермическому методу необходим хороший механический контакт поверхностей материала и чувствительного элемента датчика. Преимущества «бесконтактных» методов измерений общеизвестны; они особенно важны при измерении влажности движущихся изделий и материалов (твердых и жидких), у которых соприкосновение с датчиком вызывает повреждение или загрязнение самого материала или чувствительного элемента датчика.

Влагомеры по гигротермическому методу могут иметь единую градуировку в процентах относительной влажности воздуха; эту градуировку можно использовать для различных материалов с помощью таблиц или графиков перевода в проценты равновесной влажности.

Рассмотрим основные характеристики гигротермического метода. Характеристики влагомера определяются взаимодействием контролируемого материала и чувствительного элемента датчика с воздухом.

Для построения статической характеристики влагомера достаточно знания следующих зависимостей: 1) изотермы сорбции — десорбции контролируемого материала; 2) статической характеристики используемого датчика.

По этим характеристикам можно непосредственно построить график зависимости выходной величины датчика от влагосодержания материала. Пример такого построения приведен на рис. 10-1 для хромовой кожи и датчика с оксидной алюминиевой пленкой. Для построения графика использованы изотерма десорбции хромового опойка (рис. 10-1,*а*) и полученная автором экспе-

риментальная характеристика датчика — зависимость полного сопротивления (при 50 *гц*) от относительной влажности воздуха. Все графики на рис. 10-1 построены для температуры 25 °С. Кроме того, на графике рис. 10-1,*в* нанесены точки, соответствующие экспериментальным данным.

Важнейшим из факторов, определяющих статическую характеристику влагомера, помимо влажности является температура. Влияние этого фактора обусловлено, во-первых, перемещением сорбционных изотерм исследуемого материала при изменении температуры (см. § 1-1)

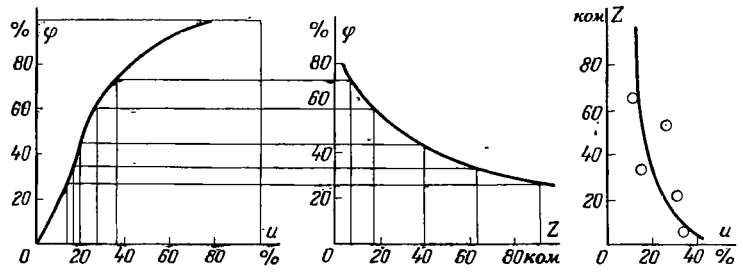


Рис. 10-1. Равновесные кривые хромовой кожи и ЭГД с оксидной пленкой при $t=25$ °С.

а — изотерма десорбции хромовой кожи; *б* — зависимость полного сопротивления Z датчика от относительной влажности φ воздуха; *в* — зависимость полного сопротивления Z датчика от влагосодержания u кожи.

и, во-вторых, температурными погрешностями, присущими большинству электрических гигрометрических датчиков. Для некоторых материалов и типов ЭГД указанные две составляющие температурной погрешности влагомера могут иметь противоположный знак, однако в большинстве случаев необходима компенсация температурной погрешности.

Вторым источником погрешностей является сорбционный гистерезис исследуемого материала; одной и той же относительной влажности воздуха соответствуют два различных значения влагосодержания, определяемые соответственно по изотерме сорбции и изотерме десорбции.

На практике влагомер приходится градуировать по средней кривой, расположенной на равных расстояниях от обеих изотерм, благодаря чему уменьшается гистерезисная погрешность Эта погрешность сильно увеличива-

ется при применении датчиков, обладающих сорбционным гистерезисом.

Динамические свойства гигротермического влагомера (исключая измерительное устройство) определяются: 1) инерционностью влагообмена между материалом и воздухом; 2) инерционностью используемого гигрометрического датчика. Динамические характеристики датчиков различных типов были рассмотрены в гл 7 и 8. Поверхностный влагообмен зависит от разности концентраций влаги на поверхности материала и в окружающей среде и при постоянстве температуры и давления описывается уравнением

$$\frac{dG}{dt} = \beta\rho_0 (u - u_p) S, \qquad (10\text{-}1)$$

где dG/dt — интенсивность перемещения влаги; β—коэффициент влагообмена; ρ_0 — плотность сухого материала; u — среднее влагосодержание поверхности материала; u_p — равновесное влагосодержание материала при данной температуре; S—площадь эффективной поверхности.

При применении (10-1) считаем, что величина u равна среднему влагосодержанию материала, т. е. исключаем из рассмотрения внутренний перенос влаги в материале.

Аналитическое определение инерционности влагообмена весьма затруднительно в связи с непостоянством коэффициента β, зависящего от скорости воздуха, формы, размеров и условий обтекания воздухом поверхности испарения и т. п.

Если принять $\beta = \text{const}$, можно аппроксимировать рассматриваемый процесс апериодическим звеном 1-го порядка. При использовании гигрометрического датчика, динамические свойства которого соответствуют такому же звену, датчик влагомера можно приближенно описать апериодическим звеном 2-го порядка с передаточной функцией

$$W(p) = \frac{k}{(T_1 p + 1)(T_2 p + 1)}, \qquad (10\text{-}2)$$

где k — статический коэффициент передачи; T_1 — постоянная времени процесса влагопереноса; T_2 — постоянная времени гигрометрического датчика.

Экспериментальные переходные характеристики достаточно хорошо согласуются с формулой (10-2). Приме-

няя к этим характеристикам известное построение, можно аппроксимировать датчик влагомера последовательным соединением звена постоянного запаздывания и апериодического звена 1-го порядка, причем запаздывание первого звена характеризует главным образом инерционность влагообмена, а постоянная времени второго звена — инерционность датчика. Для повышения быстродействия влагомера необходимо не только выбрать быстродействующий гигрометрический датчик, но и максимально увеличить поверхность влагообмена, уменьшить объем воздуха между датчиком и материалом, создать движение воздуха и повысить его скорость. Предлагалось также выдерживать датчик перед измерением в течение некоторого времени в среде с постоянной влажностью, в частности с влажностью, близкой к нулю. Такой способ уменьшает погрешности от сорбционного гистерезиса, но усложняет измерение и поэтому не нашел широкого применения.

При практической реализации влагомеров важнейшее значение имеет выбор типа гигрометрического датчика и связи датчика с материалом, которая должна удовлетворять сформулированным выше условиям уменьшения инерционности измерения. Различные способы установки гигродатчика на твердых материалах показаны на рис. 10-2. При измерении влагосодержания на поверхности материала простейший способ (рис. 10-2,*а*) заключается в установке на этой поверхности полой камеры, изготовленной из негигроскопического материала. Во внутренней полости камеры закреплен гигродатчик. Для исключения попадания внешнего воздуха внутрь камеры ее поверхность, соприкасающаяся с материалом, снабжается уплотняющей прокладкой, а сама камера прижимается к материалу грузом, пружиной и т. п.

Для создания движения воздуха в верхней части камеры (рис. 10-2,*б*) монтируется электрический нагреватель — миниатюрная спираль из тонкого провода. При нагреве спирали, даже очень незначительном, на 2—3 °С выше температуры воздуха, над поверхностью материала создается омывающий гигродатчик конвективный поток воздуха от поверхности материала. В крышке камеры предусмотрены отверстия для прохождения нагретого воздуха.

На рис. 10-2,*в* показана камера с перемешиванием воздуха с помощью механической мешалки, установлен-

ной внутри камеры и приводимой во вращение (через сальниковое уплотнение) электродвигателем, смонтированным вне камеры. Мешалка или вентилятор увеличивает объем камеры, поэтому описанный способ применим только при исследовании больших образцов материала.

Способы измерения влажности дисперсных — сыпучих и волокнистых — материалов, а также материалов в форме тюков, рулонов и т. п. сводятся к введению в тол-

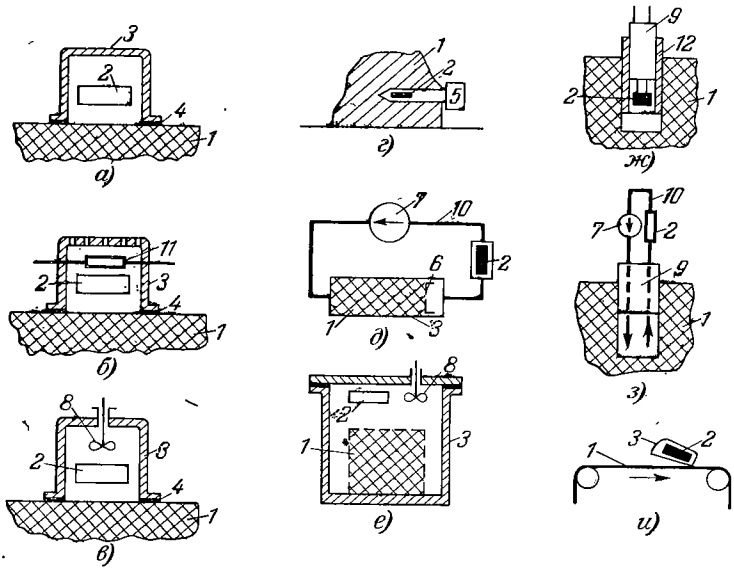


Рис. 10-2. Способы связи гигродатчика с твердым влагосодержащим материалом.

1 — исследуемый материал; *2* — гигродатчик; *3* — футляр; *4* — уплотняющая прокладка; *5* — зонд; *6* — защитная сетка; *7* — воздушный насос; *8* — мешалка или вентилятор; *9* — пробка; *10* — трубки для воздуха; *11* — электрический нагреватель; *12* — металлическая трубка.

щу материала зонда, содержащего гигродатчик (рис. 10-2,*г*), либо к измерению влажности движущегося воздуха, соприкасающегося с внешней поверхностью материала или отсасываемого из пространства между волокнами, зернами или кусками материала. Вентилятор может перемешивать воздух внутри камеры (рис. 10-2,*е*).

Схема, показанная на рис. 10-2,*д*, не требует увеличения объема камеры и позволяет повысить скорость движения воздуха. Миниатюрный воздушный насос создает в замкнутой системе, состоящей из камеры и тру-

бок для воздуха, циркуляцию постоянного объема воздуха через образец материала; сетка предотвращает унос частиц материала из образца. Необходимым условием успешной работы является отсутствие подсосов внешнего воздуха, т. е. герметичность системы. Объем воздуха в соединительных трубках и насосе должен быть небольшим, а камера должна быть заполнена полностью, но без принудительного уплотнения образца.

Измерения внутреннего влагосодержания твердых монолитных материалов удобнее всего проводить в полостях малого объема, выполненных для этой цели в теле материала. Цилиндрическую поверхность отверстия можно закрепить металлической трубкой (рис. 10-2,*ж*); пробка из влагонепроницаемого материала закрывает отверстие в материале с внешней стороны и оставляет в качестве влагоотдающей нижнюю часть поверхности скважины. Такой способ применим, например, для зондирования влажности в различных точках бетонных плотин и других сооружений; металлические трубки вводятся на нужную глубину в бетонную массу при сооружении плотины. Перед выполнением измерения уплотняющая пробка заменяется пробкой, имеющей такие же размеры и несущей гигродатчик. Для уменьшения инерционности можно и в этом случае применить воздушный насос, установленный вне скважины, который забирает воздух из полости и возвращает его туда же (рис. 10-2,*з*).

На схеме рис. 10-2,*и* показана установка гигродатчика над движущимися листовыми материалами; поток воздуха создается движением материала.

Для того чтобы исключить попадание в циркуляционную систему воздуха, не входящего в состав пограничного слоя, было предложено приемное устройство, показанное на рис. 10-3 [Л. 10-10].

Блок *7* из оргстекла установлен на постоянном расстоянии от поверхности материала *8* и имеет две полости, не сообщающиеся между собой. Полость *6* связывает воздух пограничного слоя с камерой, где находится гигродатчик *3*, с помощью замкнутой системы, состоящей из воздушного насоса *5* и трубок *4*. Воздух возвращается во вторую полость *2*, соединенную с наклонными щелями *1*, через которые он выходит под давлением, создавая «воздушную завесу», препятствующую попаданию наружного воздуха в систему.

Первые влагомеры гигротермического равновесия имели датчики с волосным чувствительным элементом. Измерения влажности почв проводились с датчиками, представляющими собой сочетание гигрометрического чувствительного элемента деформационного типа со струнным тензометрическим преобразователем. Чувствительный элемент состоял из нескольких полосок древесины, выпиленных вдоль волокон.

Влагомерам с деформационными датчиками присущи существенные недостатки. Их инерционность велика; у прибора с чувствительным элементом из древесины

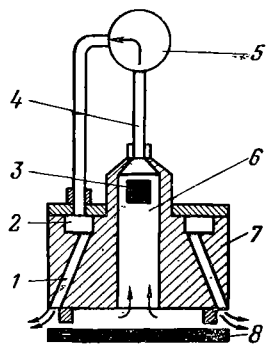


Рис. 10-3. Приемник гигротермического влагомера для листовых материалов.

время установления показаний исчислялось часами и даже сутками, у датчиков волосных или с животной пленкой — десятками минут.

При применении психрометрических датчиков, в том числе и миниатюрных термопарных, определенные затруднения связаны с необходимостью увлажнения одного из чувствительных элементов.

Перечисленные недостатки устраняются или уменьшаются при применении электрических гигрометрических датчиков. Во влагомерах — лабораторных и автоматических — применялись, в частности, датчики хлористолитиевые и с оксидной пленкой.

В датчиках влагомеров фирма Sina (Швейцария) применен чувствительный элемент из жидкого электролита, удерживаемого капиллярными силами в клиновидном зазоре между кварцевой трубкой и соприкасающимся с ней кварцевым стержнем. В полости кварцевой трубки установлен термокомпенсатор — запаянная трубка, заполненная тем же электролитом, что и гигродатчик,

и снабженая двумя платиновыми электродами. Сопротивления гигродатчика и термокомпенсатора включены в смежные плечи мостовой схемы [Л. 10-11].

К важнейшим практическим применениям рассматриваемого метода относятся автоматический контроль и регулирование влажности движущихся тонких листовых материалов (бумага, целлюлоза, текстильные ткани, фотографическая и кинопленка), в частности, в процессе их сушки.

Автоматический влагомер для фото- и кинопленки [Л. 7-22] имеет приемное устройство по рис. 10-3, в котором смонтирован малогабаритный электролитический подогревный датчик.

Дальнейшее уменьшение инерционности гигротермических влагомеров может быть достигнуто при применении в них гигрометров, например, спектроскопических, являющихся практически безынерционными. Этому препятствуют сложность и высокая стоимость указанных гигрометров; имеется, однако, положительный опыт измерения влажности глиняного бруса и керамических изделий с помощью гигрометра коронного разряда (см. § 9-1).

Мало развиты измерения весьма низких влагосодержаний ($u \leqslant 0{,}5\%$) твердых тел. Для контроля остаточной влажности обмоток электродвигателей холодильных агрегатов домашних холодильников носителем влаги служит фреон, контактирующий с обмотками в течение времени, достаточного для поглощения значительной части влаги. Такой способ можно распространить и на другие задачи, причем создается возможность измерений в труднодоступных местах, контроля изделий сложной формы и т. д. Измерение можно выполнять по схеме рис. 10-2,д; необходимо иметь носитель влаги, осушенный почти до нуля, и гигрометр (например, кулонометрический), позволяющий измерять микроконцентрации влаги.

Для жидкостей основным равновесным методом измерения влагосодержания является рассматриваемый ниже гидротермический (контактный). Однако гигротермический метод применим и к жидкостям [Л. 5-14].

Простейший способ заключается в измерении влажности воздуха, находящегося в гигротермическом равновесии с поверхностью неподвижной жидкости в замкнутом сосуде. На таком принципе с применением рецирку-

ляционного устройства по рис. 10-2,*з* была основана система автоматического регулирования влагосодержания растворителей для химической чистки одежды и тканей. Инерционность такого влагомера велика; ее можно уменьшить использованием сосуда, на внутренних стенках которого создается тонкая пленка непрерывно протекающей жидкости, от влагосодержания которой зависит влажность воздуха, заполняющего сосуд. Были предложены различные конструктивные исполнения такого устройства. Влагомер для автоматического контроля потока жидкости [Л. 10-12] имеет термостатированную проточную камеру. Жидкость, поступающая под давлением, протекает между двумя вертикальными соосными цилиндрическими трубками, зазор между которыми значительно меньше их длины. ЭГД цилиндрической формы расположен в полости внутренней трубки и омывается потоком воздуха, который предварительно контактирует с поверхностью жидкости в выходной воронке камеры.

При общей оценке метода гигротермического равновесия следует принять во внимание, что результаты измерения влажности свободны от погрешностей, связанных с составом, плотностью и другими параметрами анализируемого материала лишь при условии, что эти параметры не влияют на изотермы сорбции. Если же, например, разным сортам материала соответствуют сильно отличающиеся друг от друга сорбционные изотермы, возникает необходимость в раздельных градуировках для каждого сорта. Источником неустранимых погрешностей служит также гистерезис сорбционных изотерм. Чувствительность влагомеров обычно очень высока в области влагосодержаний, соответствующих средним значениям относительной влажности φ; она уменьшается при $\varphi > 85 \div 90\%$, а для влагосодержаний, близких к максимальному гигроскопическому ($\varphi > 96 \div 97\%$), результаты измерения становятся ненадежными.

Специфическую разновидность гигротермических влагомеров образуют приборы, в которых гигрометрический датчик приходит в равновесие не с окружающей средой (воздухом), а с потоком вспомогательного носителя водяных паров — сухого инертного газа (обычно азота или воздуха). Такой способ был реализован с применением кулонометрических гигрометров для автоматического контроля весьма малых влагосодержаний некоторых органических жидкостей, топлив для реактивных двигате-

лей, смазочных и трансформаторных масел. Прямое измерение влагосодержания жидкостей (на основе гидротермического равновесия) при их протекании через кулонометрический датчик невозможно, так как при этом будет разрушаться влаточувствительная пленка.

В принципе рассматриваемый метод можно использовать для любых жидкостей, не дающих паров, которые могут вступать в реакцию с фосфорным ангидридом кулонометрического датчика. При этом используется абсорбционный метод с пленочной колонной — абсорбером.

Исследуемая жидкость подается в верхнюю часть цилиндрической камеры колонны, изготовленной из нержавеющей стали и имеющей на внутренней поверхности винтовую нарезку. Дозировочный насос создает постоянный расход поступающей жидкости. Жидкость в камере стекает вниз и образует на поверхности резьбы тонкую пленку; сухой газ подводится противотоком через нижний штуцер камеры и, соприкасаясь с поверхностью жидкости, поглощает содержащуюся в ней влагу.

Во избежание уноса контролируемой жидкости газ с поглощенной влагой проходит через расположенный в верхней части колонны каплеотделитель и поступает в измерительный кулонометрический датчик. Величина расхода газа не влияет на результаты измерения при условии, что она больше величины, необходимой для полного удаления влаги из жидкости. Верхний предел этого расхода ограничен, как обычно у кулонометрических датчиков, необходимостью осуществления полного электролиза влаги. Отношение расходов газа и жидкости обычно не меньше 100 : 1. При условии постоянства массового расхода жидкости сила тока электролиза одинакова для любых жидкостей и является однозначной функцией их влагосодержания.

Обычно верхний предел измерений ограничивают несколькими или десятками миллионных долей; при этом применяются миниатюрные колонны — абсорберы (например, диаметром 6 *мм,* высотой 300 *мм);* для измерения более высоких влагосодержаний необходимо более эффективное удаление влаги, т. е. абсорберы должны иметь большие размеры. Постоянная времени всего анализатора для жидкости составляет от 1,5 до 5 *мин.*

Измерение влажности твердых материалов кулонометрическим методом осуществляется после перевода влаги в парообразное состояние путем

нагревания незначительного количества влажного материала в печи и уноса влаги потоком сухого инертного газа.

Во влагомере, построенном на рассматриваемом принципе, применяется высокочастотный нагрев. В рабочей камере высокочастотной печи на платиновой тарелочке устанавливается исследуемый образец влажного материала весом до 25 *мг*. Нагрев осуществляет ламповый генератор с индуктором, охватывающим рабочую камеру. Сухой азот подается в печь под давлением около 1,5 *кгс/см*^{2} и вместе с влагой, испаренной из образца, поступает в кулонометрический датчик.

Длительность цикла измерения T устанавливается с помощью реле времени. Для определения количества влаги в образце интегрируют ток электролиза в течение времени T. Отсчет по шкале выходного прибора интегрирующего устройства при известной массе образца позволяет определить влажность материала.

Температуру в рабочей камере (ее максимальное значение равно 250 °С) и скорость нагрева задают изменением параметров (R, C) сеточной цепи лампы генератора; при этом изменяется мощность, подаваемая на индуктор.

Описанный влагомер позволяет измерять весьма низкие влагосодержания, близкие к нулю. В этом заключается его практическая ценность, так как обычный метод высушивания в этой области по ряду причин дает неточные показания. В то же время описанный метод не позволяет автоматизировать контроль влажности и требует дополнительного сложного и громоздкого оборудования для перевода влаги в газовую фазу. Последний недостаток относится и к кулонометрическим влагомерам для жидкостей; он остается в силе и при замене кулонометрического гигрометра другим прибором для измерения низких влагосодержаний (например, сорбционно-термическим), что в принципе вполне возможно.

Кулонометрические приборы для измерения влажности жидкостей и газов представляют определенный интерес как один из первых примеров унифицированных средств измерения влажности для всех трех агрегатных состояний тела.

Перейдем теперь к рассмотрению гидротермического равновесного, т. е. сорбционного контактного, метода.

При плотном соприкосновении влагочувствительного элемента сорбционного датчика с контролируемым материалом через соприкасающиеся поверхности происходит обмен влагой в жидком состоянии. Условием гидротермического равновесия материала и соприкасающегося с ним датчика отнюдь не является равенство их влагосодержаний.

Как было показано в § 1-1, кинетика переноса влаги определяется градиентом потенциалов массопереноса θ. В системе двух соприкасающихся тел перенос влаги происходит от тела с большим потенциалом к телу с меньшим потенциалом до достижения равенства их потенциалов. Направление переноса влаги может быть и от тела с меньшим влагосодержанием к телу с большим влагосодержанием, так как оно определяется только соотношением потенциалов. При достижении равновесия на границе соприкосновения потенциалы равны, а влагосодержание резко изменяется.

Для вычисления статической характеристики влагомера — зависимости выходной электрической величины y датчика от влагосодержания u_x исследуемого материала — необходимо и достаточно знание следующих характеристик:

а) зависимости потенциала переноса от влагосодержания для исследуемого материала $\theta_x(u_x)$;

б) этой же зависимости для влагочувствительного материала датчика $\theta_д(u_д)$;

в) зависимости выходной электрической величины y датчика от его влагосодержания $y(u_д)$.

Характеристику $y(u_x)$ можно построить, исходя из условий равновесия $\theta_x=\theta_д$. Построение характеристики влагомера на основе зависимостей потенциалов от влагосодержания позволяет заранее решить вопрос о пригодности влагочувствительного элемента для измерения влажности определенного материала в заданном диапазоне. Однако до сих пор материал датчиков выбирался эмпирически и также эмпирически производилась их градуировка.

Укажем на некоторые специфические особенности рассматриваемого метода. Чувствительный элемент датчика должен обладать высокой гигроскопичностью и максимально развитой поверхностью. Практически невозможно получить идеальный контакт по всей поверхности соприкосновения; следует иметь в виду, что появ-

лёние значительных воздушных прослоек между датчиком и контролируемым материалом может внести погрешности по отношению к первоначальной градуировке. Загрязнение поверхности датчика, закрывающее его поры даже частично, увеличивает инерционность измерения, а загрязнение всей поверхности выводит датчик из строя. Основным типом датчиков данных влагомеров являются электрические датчики (ЭГД).

Применению электролитических ЭГД препятствует возможность загрязнения и повреждения чувствительного элемента. Исключение составляют измерения в мелкодисперсных (порошкообразных) материалах, не содержащих абразивных частиц и загрязнений. Так, например, для измерения влажности (9—14%) пшеничной муки успешно применялись хлористолитиевые электролитические датчики. Однако и в этом случае оказалась необходимой очистка чувствительного элемента сжатым воздухом после каждого измерения.

Значительно чаще применяются сорбционные датчики, у которых влагу поглощает весь объем гигроскопического вещества («абсорбционные» ЭГД). Наибольшее практическое применение они нашли для определения и дистанционного контроля влажности почвы в условиях ее естественного залегания без выемки образцов и нарушения структуры. Для этой цели Д. Д. Бойукос [Л. 10-13] предложил использовать гипсовые пластины, снабженные металлическими проволочными электродами; такие «гипсовые блоки» закладывались в почву на нужную глубину; с помощью переносного измерительного моста или омметра измерялось их омическое сопротивление в цепи переменного тока.

В СССР гипсовые датчики для измерения влажности почв применяли ряд исследователей, в частности В. П. Остапчик [Л. 10-14]. Датчики его конструкции представляли собой отливки толщиной 15 *мм* и сечением 25×50 *мм* из химически чистого гипса с жестко закрепленными внутренними электродами из медного луженого провода сечением 6 *мм*^{2}.

Гипсовые блоки отличаются простотой конструкции и изготовления; была разработана методика, позволяющая получать датчики, близкие к взаимозаменяемости по своим характеристикам. Однако эти датчики имеют также ряд существенных недостатков. Они не охватывают всего диапазона влажности от воздушно-сухого состоя-

ния почвы до полевой влагоемкости. Кроме того, при очень высокой влажности почв гипс начинает разрушаться. В засоленных почвах применение гипсовых блоков возможно только при концентрациях почвенного раствора, не превышающих 2—3 *г/л* (в переводе на NaCl); более высокое солесодержание оказывает заметное влияние на величину проводимости блоков. Наконец, инерция блоков весьма высока, особенно при отдаче влаги (см. ниже).

Автор гипсовых блоков предпринял ряд попыток устранения этих недостатков, которые, однако, оказались малоэффективными. В частности, он предложил электроды в виде сеток из нержавеющей стали, а в качестве материала для изготовления датчиков окончательно выбрал чистый гипс (без добавок солей), прокаленный при низкой температуре [Л. 10-13]. Ряд исследователей предложил использовать в датчиках, закладываемых в почву, стеклянное, нейлоновое или капроновое волокно с пластинчатыми электродами, например из никеля. Такие датчики обладают большей прочностью и большим сроком службы, более чувствительны к изменениям влажности, чем гипсовые, и позволяют измерять более высокую влажность. В то же время их сопротивление сильно зависит от солесодержания почв.

Рассмотрим общие характеристики влагомеров, основанных на гидротермическом равновесии. Основной статической характеристикой датчика влагомера является экспериментальная зависимость выходной электрической величины — чаще всего омического сопротивления R_x — от влажности W исследуемого материала. Обычно ее строят в полулогарифмическом масштабе $\lg R_x(W)$.

Форма характеристики зависит как от свойств исследуемого материала, так и от свойств датчика.

Химический состав материала оказывает меньшее влияние в рассматриваемом методе, чем при измерениях электрическими влагомерами.

В то же время многочисленные данные, полученные в различных условиях, свидетельствуют о том, что не только абсолютные значения R_x, но и форма характеристики $R_x(W)$ зависят от свойств влажного материала, в частности от типа почв, и сильно отличаются, например, у песчаных и суглинистых почв. Аналогичные данные были получены для естественных и промышленных строительных материалов.

Основным фактором, определяющим форму характеристики, являются, как уже отмечалось, потенциалы переноса влаги материала и влагочувствительного элемента, определяющие метрологические свойства влагомера. С этим связано влияние на результаты измерения таких параметров влажного материала, как плотность, гранулярный состав. Решающее значение имеют геометрические размеры капилляров датчика и распределение капилляров по размерам, вернее, соотношение этих величин у обоих элементов системы датчик — материал; это отношение определяет величину градиентов потенциалов.

Очевидно, что наилучшие результаты могут быть достигнуты при равенстве размеров пор датчика и влажного материала; это приводит к использованию в датчике самого исследуемого материала.

В рассматриваемом методе наиболее правильно характеризовать влагосодержание материала потенциалом массопереноса. Такая градуировка была бы единой для различных типов почв, а также для других материалов.

Одной из особенностей гидротермических влагомеров является сорбционный гистерезис их статических характеристик. Гистерезисные погрешности измерения неустранимы; их можно лишь уменьшить выбором датчика.

Вторым недостатком (особенно при применении гипсовых датчиков) является значительная инерционность. У этих влагомеров сведена к минимуму инерционность переноса влаги через воздушную прослойку, присущая гигротермическим влагомерам, однако перенос влаги в абсорбционном ЭГД со значительным объемом сорбента также может быть очень длительным. У гипсовых датчиков установившееся значение сопротивления датчика достигалось через 1—2 *ч* в воздухе и лишь по истечении нескольких часов — в почве [Л. 10-14]. Инерция этих датчиков при убыли влаги больше, чем при увлажнении.

Температура оказывает закономерное влияние на результаты измерения — при постоянной влажности и повышении температуры сопротивление датчика уменьшается.

По экспериментальным данным В. П. Остапчика логарифм сопротивления гипсового датчика линейно уменьшается с ростом его температуры; угол наклона

прямых $\lg R_x(t)$ мало изменяется с изменением влажности. Это позволяет принять единую величину температурного коэффициента влажности, равную 0,08% на 1 °С.

Засоленность почв или грунтов перемещает характеристику $\lg R_x(W)$ вниз и уменьшает чувствительность к изменениям влажности и температуры. Для каждого типа датчика существует некоторый верхний предел содержания солей в почве, выше которого точность измерения влажности становится недостаточной

Рассматриваемый метод весьма удобен для контроля влажности почв, грунтов, строительных конструкций и сооружений; датчики отличаются своей простотой, а измерения свободны от некоторых недостатков прямых электрических методов. Наряду с этим по ряду показателей (инерционность, гистерезисные погрешности, ограниченные пределы измерений) контактные влагомеры весьма несовершенны. Это в значительной степени является следствием несовершенства применяемых датчиков, например гипсовых. Необходимо дальнейшее улучшение статических и динамических свойств датчиков, в частности разработка способов получения нужной геометрии капилляров чувствительных элементов.

Областью, где контактный влагообмен используется более успешно, является измерение влажности жидкостей, в первую очередь некоторых нефтепродуктов. Известны приборы для контроля влагосодержания (обычно низкого — в пределах до 100—120 м. д.) трансформаторного масла, авиационных топлив и т. п., в которых влагочувствительным элементом проточных датчиков служили тонкие бумажные мембраны, зажатые между металлическими перфорированными пластинами или кольцами.

В современных влагомерах для жидкостей используются более совершенные твердые сорбенты — цеолиты, окись алюминия, силикагель. Разработанный в США автоматический влагомер [Л. 10-15] имеет проточный датчик, встраиваемый в трубопровод. Его чувствительный элемент выполнен в виде коаксиального конденсатора с двумя металлическими перфорированными электродами; узкий зазор (шириной меньше 1 *мм*) между ними заполнен мелко измельченным сорбентом. С торцов конденсатор закрыт дисками из пористого влагопроницаемого фторопласта. Измерительная схема работает при частоте 15 *кгц* на принципе автоматического уравнове-

шивания емкости датчика переменным конденсатором, которым управляет следящая система.

Значительный интерес представляет применение для измерений очень низких влагосодержаний жидкостей ЭГД сорбционного типа с тонким влагочувствительным слоем (§ 8-2); в частности, для этой цели использовались алюминиевооксидные датчики. При этом существенное значение имели малые габариты, прочность и малая инерционность этих датчиков. Ограничением является их чувствительность к перегрузкам по влажности. Отсутствуют также данные о длительной устойчивости их характеристик при работе в жидкостях.

Глава одиннадцатая

МЕТРОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ИЗМЕРЕНИЙ ВЛАЖНОСТИ

11-1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Задачи метрологического обслуживания измерений влажности возникли сравнительно недавно, после того как эти измерения заняли место одной из отраслей аналитической техники. Как и в других отраслях измерительной техники, основной метрологической задачей является сохранение и поддержание точности и единства измерений.

Значение этой задачи для измерений влажности особенно велико по ряду причин. Во-первых, влажность менее определенная величина, чем ряд других физико-химических параметров. Например, у капиллярнопористых тел понятие «истинное значение» влажности условно и тесно связано с целью измерения. Это вызвано различными формами состояния и связи влаги с твердой фазой (см. § 1-1) и ее неравномерным распределением в материале, вследствие которого так называемые средние пробы (при несовершенстве существующих способов их отбора) недостаточно точно характеризуют влагосодержание всей массы материала. Во-вторых, большинство современных влагомеров и гигрометров градуируют не на основе точных математических зависимостей, а эмпирически.

Наконец, большая сфера применения и массовость измерений влажности и их экономическое значение в ряде отраслей народного хозяйства предопределяют экономическое значение метрологического обеспечения и высокие требования, предъявляемые к нему.

Метрологическая база измерений влажности в виде исходных эталонов или эталонных установок и средств передачи единиц измерений к образцовым и рабочим приборам в СССР и других стра-

нах находится лишь в стадии создания; ее состояние рассматривается в § 11-2 и 11-3.

Метрология измерений влажности тесно связана со стандартизацией, в частности со следующими её направлениями:

а) регламентация влагосодержания различных материалов, используемых в народном хозяйстве; б) стандартизация методов аналитического лабораторного контроля влажности; в) стандартизация физических методов измерения влажности и технических средств, основанных на этих методах; г) стандартизация поверочных схем, эталонов, образцовых методов, установок и веществ; д) создание единой терминологии, системы единиц измерения и стандартных справочных данных в области измерений влажности.

Последнее направление разрабатывается сейчас в СССР; в других странах стандартизованы лишь отдельные вопросы (см., например, [Л. 11-1]). Рассмотрим здесь первые три пункта из перечисленных выше.

Ограничения допустимых пределов влагосодержания разных материалов предусмотрены более чем в 1 500 государственных стандартов СССР, а также в ряде ведомственных норм на различные виды промышленной и сельскохозяйственной продукции [Л. В-2].

Лабораторные аналитические методы определения влажности предусмотрены в ГОСТ на материалы и, реже, в специальных стандартах на методы и аппаратуру их испытаний. Основные методы для твердых материалов и жидкостей были рассмотрены в § 1-3; для газов стандарты в большинстве случаев рекомендуют гравиметрический метод полного поглощения или точки росы.

Система государственных стандартов, относящихся к регламентации и определениям влажности, создавалась на протяжении ряда лет для различных отдельно взятых материалов или групп материалов и страдает существенными недостатками. Методики и аппаратура этих определений не унифицированы; большие расхождения имеются также в способах отбора и подготовки проб.

Для градуировки и поверки влагомеров и гигрометров наиболее важно то обстоятельство, что точность аналитических методов во многих случаях не выше точности градуируемого или поверяемого прибора. В большинстве случаев значения погрешностей лабораторных методов вообще не известны. Действующие стандарты, как правило, нормируют лишь допустимые расхождения между параллельными определениями влажности, чаще всего для двух проб, как это принято для нефти (ГОСТ 2477-65), зерна (ГОСТ 3040-55) и ряда других материалов. Эти расхождения характеризуют, в лучшем случае, сходимость результатов определений, но не могут служить критерием их точности.

Физические методы измерения влажности и приборы, основанные на этих методах, очень слабо представлены в стандартах. В большинстве стран стандартизированы лишь простейшие (кондуктометрические и, реже, диэлькометрические) влагомеры для зерна и древесины.

В последние годы в СССР разрабатываются и вводятся в действие государственные стандарты на влагомеры и гигрометры современных типов также для других материалов, например [Л. 11-2].

Рассмотрим теперь некоторые общие вопросы, относящиеся к градуировке и определению погрешностей влагомеров и гигроме-

тров [Л. 11-3]. Как уже указывалось в предыдущих главах, большинство приборов для измерения влажности градуируется эмпирически. При градуировке и поверке этих приборов их показания (y) сличают с результатами определения влажности образцовым методом (x). Допущенные при градуировке ошибки не являются одноразовыми, а становятся составляющей систематической погрешности градуируемого прибора.

Эмпирическая градуировка обычно должна решать две задачи:

а) определение градуировочной зависимости $y(x)$, удовлетворяющей требованию наиболее точного соответствия статистическим данным;

б) оценка основной погрешности градуируемого прибора.

При построении градуировочной характеристики по экспериментальным данным возможен различный подход:

1. Если рассматривать эту характеристику как зависимость случайной зависимой переменной y от неслучайной независимой переменной x, можно применить для градуировки регрессионный анализ экспериментальных данных. Это соответствует наиболее простому решению задачи и допустимо, если погрешность образцового метода пренебрежимо мала (практически не больше $^1/_3$ погрешности градуируемого влагомера или гигрометра).

2. Если погрешностью образцового метода нельзя пренебречь или если ее значение не известно, следует рассматривать y и x как случайные величины, между которыми существует не регрессионная, а корреляционная связь.

В общем случае тесноту связи характеризует корреляционное отношение ρ_{yx} ($0 \leqslant \rho_{yx} \leqslant 1$); при линейной форме связи $\rho_{yx} = |r_{yx}|$ (r_{yx} — коэффициент парной корреляции между y и x). Критерием для выбора вида уравнения регрессии может служить максимизация коэффициента детерминации ρ^2, определяющего часть изменчивости y, обусловленную изменчивостью x. Величина $(1-\rho^2)$ характеризует ту часть общей дисперсии, причиной которой являются другие влияющие величины, не учитываемые при градуировке. Для оценки погрешности влагомера или гигрометра можно использовать дисперсию $D(y/x)$ и доверительные интервалы градуировочной характеристики, соответствующие принятой доверительной вероятности (например, для влагомеров 0,95).

Форма связи между y и x может быть линейной или нелинейной. В широком диапазоне влажности градуировочная характеристика влагомеров и гигрометров многих типов нелинейна.

В случае, когда уравнение регрессии нелинейно относительно коэффициентов, его можно линеаризовать с помощью преобразований различных видов, например логарифмических. Если же функция $y(x)$, нелинейная относительно x, линейна относительно коэффициентов, целесообразно применить параболическую аппроксимацию. Известно, что такую функцию можно аппроксимировать на конечном интервале с любой точностью параболой k-го порядка.

Градуировка диэлькометрического влагомера методом линейной корреляции рассмотрена в [Л. 11-4]. В [Л. 11-5] на примере кондуктометрических влагомеров показано, что аппроксимация параболой позволяет повысить точность градуировки. Громоздкость и трудоемкость вычислений, связанных с использованием для градуировки корреляционного анализа, легко преодолеваются при применении средств современной вычислительной техники (ЭЦВМ).

11-2. МЕТОДЫ И ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ГРАДУИРОВКИ И ПОВЕРКИ ГИГРОМЕТРОВ

Систему передачи единицы измерения от эталона (или эталонной установки) к рабочим измерительным приборам описывают проверочной схемой. Сложность создания проверочной схемы для гигрометров обусловлена тем, что диапазон измерений влажности газов и парогазовых смесей охватывает 10—11 порядков (от $5 \cdot 10^{-8}$ до 10^3 *г/м*^{3} и более), диапазон температур от —60 °С и ниже до 600 °С и выше при давлениях до 400 *кгс/см*^{2},

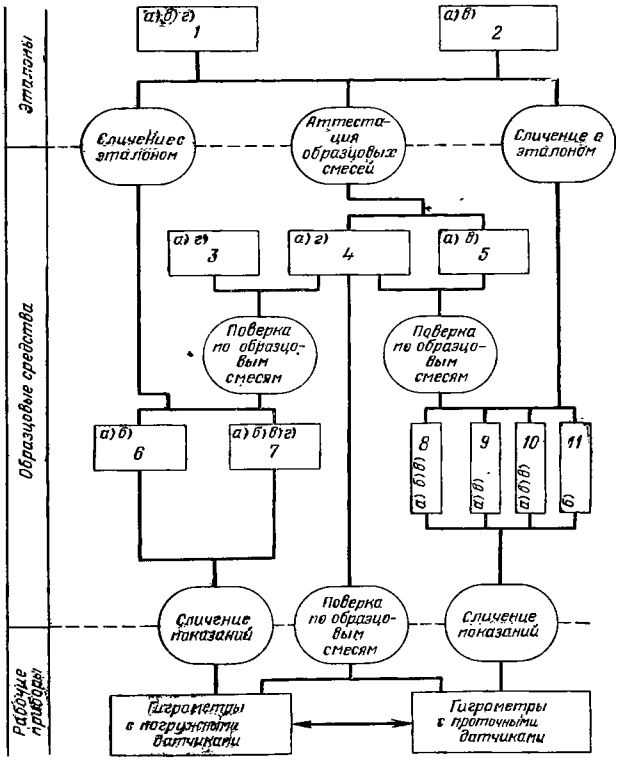


Рис. 11-1. Общая поверочная схема для гигрометрии.

скоростях от 0 до 15 *м/сек* и различном химическом составе объектов измерения [Л. 11-6]. Необходимо также учесть общие требования, предъявляемые ко всем поверочным схемам: образцовые средства различных разрядов должны обладать необходимой точностью, схема должна содержать минимальное число элементов и передаточных ступеней с максимальной унификацией элементов поверочной аппаратуры и применением наиболее простых способов и средств поверки для рабочих приборов наиболее распространенных типов.

В поверочных схемах для аналитических измерений в газах и воздухе используются как образцовые приборы, так и газовые смеси заданного состава. Эти направления нашли отражение в изображенной на рис. 11-1 поверочной схеме для гигрометрии [Л. 11-7], составленной на основании рекомендаций национальных и международных организаций: а) Отдела стандартизации Секретариата СЭВ; б) Всемирной метеорологической организации (ВМО); в) Всесоюзного научно-исследовательского института метрологии (ВНИИМ); г) Национального бюро эталонов США (НБЭ).

В основу построения схемы положено деление (несколько условное) гигрометров на две группы: с погружными и проточными датчиками. Гигрометрам с погружными датчиками соответствует левая часть схемы, с проточными — правая; буквами на символах элементов схемы обозначены рекомендующие их организации: а) СЭВ; б) ВМО; в) ВНИИМ; г) НБЭ.

Схема состоит только из эталонного и одного образцового разрядов. Верхнее звено поверочной схемы образуют эталонные установка и прибор, основанные на абсолютных методах. Установка *1*, работающая по гравиметрическому методу полного поглощения, предназначена для измерения объемных влагосодержаний от 1 000 до 10 000 м. д. Образцовый кулонометрический гигрометр *2* также охватывает широкий диапазон влагосодержаний.

В среднее звено схемы входят установки, создающие образцовые среды — паровоздушные или парогазовые смеси с заданными значениями влагосодержания, а также образцовые приборы. К первой категории относятся солевые гигростаты *3*, позволяющие получать воздух с относительной влажностью φ от 3 до 98%, и генераторы влажности — «двухтемпературный» или на принципе

двух давлений *4* ($10 \leqslant \varphi \leqslant 98\%$) и диффузионный *5* для влагосодержаний 3—20 000 м. д.

К образцовым приборам отнесены: гигрометр *6* с сорбционным электрическим датчиком, аспирационный психрометр Ассмана *7*, гигрометр точки росы *8*, кулонометрический гигрометр *9* (класса точности более низкого, чем *2*), пневматический мост *10* и рефрактометр СВЧ *11*.

Эталонные средства используются в схеме двояким образом: для аттестации образцовых смесей, создаваемых генераторами при различных режимах работы, и для аттестации образцовых приборов методом сличения показаний на парогазовых смесях различного влагосодержания. Градуировка и поверка рабочих гигрометров, проточных и погружных, также может выполняться либо по образцовым смесям, либо сличением показаний с образцовыми приборами. Диапазон малых и микровлагосодержаний (ниже $100—10 \cdot 10^{-6}$) требует применения особых образцовых средств, рассматриваемых ниже. При организации системы поверочных лабораторий в них могут найти применение те или иные образцовые средства и приборы поверочной схемы.

Образцовые приборы большинства типов описаны во второй части книги. Рассмотрим теперь еще не описанные элементы общей поверочной схемы.

Общепризнанным эталоном в гигрометрии среднего диапазона является гравиметрический гигрометр полного поглощения. Измеряемую величину — влагосодержание (отношение смеси) d определяют как

$$d = m_{\text{п}} / V_{\text{с}} \rho_{\text{с}},$$

где $m_{\text{п}}$ — масса водяного пара; $V_{\text{с}}$, $\rho_{\text{с}}$ — соответственно объем и плотность абсолютно сухого газа при значениях температуры и давления, соответствующих моменту измерения.

Установка этого типа, разработанная НБЭ [Л. 11-8] (рис. 11-2), состоит из двух основных частей: системы поглощения влаги для определения ее массы и системы измерения объема газа, прошедшего через первую систему. Анализируемый газ пропускают через три последовательно соединенных съемных стеклянных сосуда (имеющих форму U-образных трубок), заполненных тверды-

ми сорбентами — $Mg(ClO_4)_2$ (первая трубка) и P_2O_5 (вторая и третья). Для определения величины $m_п$ сравнивают массу трубок до и после протекания газа с помощью точных аналитических весов, установленных в термостатируемом помещении. Система измерения объема газа состоит из двух калиброванных по объему цилиндрических камер, изготовленных из нержавеющей стали и погруженных в термостатированную масляную ванну. Камеры автоматически заполняются попеременно;

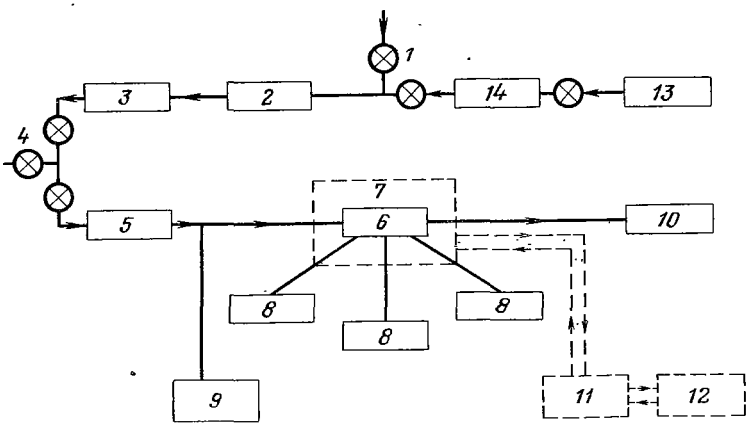


Рис. 11-2. Блок-схема гравиметрического гигрометра полного поглощения.

1 — вход анализируемого газа; *2* — основные осушители; *3* — расходомер; *4* — байпасная линия; *5* — регулятор расхода; *6* — система измерения объема газа; *7* — масляная ванна; *8* — приборы для измерения давления, температуры и разрежения; *9* — реле давления; *10* — вакуумный насос; *11* — ванна с хладоагентом; *12* — холодильная установка; *13* — газ для промывки; *14* — осушители.

при достижении установленного значения давления газа (50—700 *мм рт. ст.*) в одном сосуде реле давления переключает поток осушенного газа на второй сосуд, а первый соединяет с вакуумным насосом. Массу сухого газа вычисляют по числу заполнений камер с учетом его температуры и давления.

В состав установки входят вспомогательные устройства: система осушки сжатого воздуха, используемого для промывки установки перед измерением, холодильная установка для понижения температуры масляной ванны и байпасная линия с запорными клапанами, дающими

возможность соединить газовый тракт с окружающей средой, а также изолировать основные осушители.

Длительность пропускания газа должна обеспечить поглощение массы влаги, которую можно определить с достаточной точностью. В зависимости от расхода газа и его влагосодержания она колеблется от 5 *мин* до 30 *ч*; предварительная промывка продолжается около 16 *ч*. Пределы измерений ограничены с нижней стороны погрешностью и длительностью измерения, с верхней — максимальной температурой помещения (30 °С), которая должна превышать температуру точки росы. Установка НБЭ позволяет измерять влагосодержание в пределах 0,19—27 *мг/г*. Анализ всех источников погрешностей [Л. 11-8] показал, что общая относительная погрешность установки в указанных пределах равна ±0,13% измеряемого значения влагосодержания. Столь высокая точность достижима только при условии очень высокого качества изготовления и эксплуатации установки.

Известны попытки усовершенствования гигрометра описанного типа. В [Л. 11-9] предложена конструкция устройства для сосуда с влагопоглощающим веществом, позволяющая определять его массу без необходимости съема и переноса на весы. Благодаря этому все операции после первоначальной установки сосуда выполняются без прикосновения к нему человеческой руки и систему осушки вместе с весами можно поместить в камеру с кондиционируемым воздухом.

Рассмотрим теперь образцовые средства, предусмотренные поверочной схемой, и некоторые менее распространенные установки и приборы, не вошедшие в эту схему. Чаще всего для поверки и градуировки гигрометров применяют камеры-гигростаты — лабораторные установки, в рабочей камере которых можно в течение длительного времени поддерживать заданные (в достаточно широком диапазоне) значения влажности паровоздушной или паротазовой смеси. Современные камеры-гигростаты, как правило, автоматизированы; в термогигростатах, кроме влажности, автоматически регулируется и температура смеси.

На практике применяется много разновидностей камер-гигростатов; их общим свойством является контроль и управление с помощью контрольных гигрометров. Точность получаемых смесей определяется в значительной мере погрешностями гигрометра; характеристики гигро-

метра часто ограничивают и диапазон изменения влажности.

Значительно больший интерес представляют установки, в которых можно получать парогазовые смеси с заданными значениями влажности по результатам измерения других параметров или физико-химических свойств смеси. Такие установки, именуемые «генераторами влажности», после аттестации можно использовать в качестве образцовых без необходимости прибегать к помощи образцовых гигрометров.

Генераторы влажности могут быть основаны на следующих принципах:

а) насыщение воздуха над поверхностью водных растворов солей или кислот («солевые тигростаты»);

б) изменение температуры или давления насыщенного воздуха (генераторы влажности двухтемпературные и на принципе двух давлений);

в) смешение насыщенного и сухого воздуха в известном соотношении (тигростаты на принципе смешения).

В последних двух методах газ или газовая смесь насыщаются водяным паром над поверхностью воды.

В установках первого типа получение парогазовых смесей заданной влажности с возможностью их сохранения в течение длительного времени основано на том, что в замкнутом объеме над поверхностью некоторых жидкостей устанавливается определенное значение упругости водяного пара, определяемое видом жидкости (или ее концентрацией) и температурой. На практике используется вода для получения относительной влажности $\varphi = 100\%$, а для более низких значений φ — насыщенные водные растворы солей, смеси некоторых кристаллогидратов, водные растворы серной кислоты и глицерина.

Применяемые чаще всего растворы гигроскопических солей готовят из дистиллированной воды и химически чистых солей. В соответствии с законом Рауля относительная влажность воздуха над водными растворами определяется выражением

$$\varphi = 1 - \frac{n_в M_в}{n_в M_в + n_с M_с}, \qquad (11\text{-}1)$$

где $M_в$, $M_с$ — молекулярные массы воды и растворенного вещества ($M_в = 18$); $n_с$ — число молей вещества, растворенных в $n_в$ молях воды.

При больших концентрациях растворенного вещества наблюдается отклонение от соотношения (11-1).

Основными справочными материалами о значениях φ над солевыми растворами и влиянии температуры на эти значения являются экспериментальные данные. В гигрометрии наиболее надежными считаются данные НБЭ [Л. 11-10], приведенные в табл. 11-1.

Таблица 11-1

Температура, °С	Относительная влажность воздуха над насыщенными растворами солей, %						
	$LiCl \cdot H_2O$	$MgCl_2 \cdot 6H_2O$	$Mg(NO_3)_2 \times 6H_2O$	NaCl	$(NH_4)_2SO_4$	KNO_3	K_2SO_4
0	14,7	35,0	60,6	74,9	83,7	97,6	99,1
5	14,0	36,4	59,2	75,1	82,6	96,6	98,4
10	13,3	34,2	57,8	75,2	81,7	95,5	97,9
15	12,8	33,9	56,3	75,3	81,1	94,4	97,5
20	12,4	33,6	54,9	75,5	80,6	93,2	97,2
25	12,0	33,2	53,4	75,8	80,3	92,0	96,9
30	11,8	32,8	52,0	75,6	80,0	90,7	96,6
35	11,7	32,5	50,6	75,5	79,8	89,3	96,4
40	11,6	32,1	49,2	75,4	79,6	87,9	96,2
45	11,5	31,8	47,7	75,1	79,3	86,5	96,0
50	11,4	31,4	46,3	74,7	79,1	85,0	95,8

Более полные данные, охватывающие растворы 88 солей в диапазоне температур от 2 до 100 °С, приведены в работе [Л. 11-11], содержащей также некоторые указания о свойствах этих растворов — величине температурного коэффициента, токсичности, агрессивности и т. д. Работа [Л. 7-19] содержит данные о 16 солях, причем для трех из них (NaOH, LiCl, $CaCl_2$) с температурными интервалами в 0,5 °С и меньше для областей температур, близких к точкам гидратного перехода.

Для получения величин $\varphi < 10\%$ используются насыщенные растворы P_2O_5 (для температур от 2 до 50 °С можно считать $\varphi = 0$) и NaOH (при температуре 25 °С $\varphi \approx 6{,}5\%$). Равновесная влажность очень мало зависит от общего давления парогазовой смеси (в пределах до нескольких *кгс/см*^{2}).

К достоинствам солевых гигростатов следует отнести их простоту и надежность в эксплуатации. Их недостатками являются возможность получения лишь ограничен-

ного числа дискретных значений влажности, ограниченный температурный диапазон, пределы которого определяются температурами кипения и замерзания используемого раствора при данном давлении, а также большая длительность достижения равновесной влажности. Кроме того, некоторые неудобства связаны с необходимостью замены раствора для перехода к новому значению влажности.

Для обеспечения правильной работы и надлежащей точности необходимы определенные предосторожности. Камера и ее узлы должны изготовляться из негигроскопических материалов; термостатирование камеры должно минимизировать температурные градиенты в ней. Для уменьшения длительности переходных процессов максимально увеличивают отношение площади поверхности раствора к объему воздуха в камере и создают интенсивное перемешивание или циркуляцию этого воздуха. Испытуемые в камере изделия не должны нарушать гигротермического равновесия выделением или поглощением тепла или влаги.

При условии правильного построения и эксплуатации солевых гигростатов с их помощью можно получать парогазовые смеси с абсолютной погрешностью, не превышающей $\pm 1\%$ относительной влажности.

Примерами солевых гигростатов могут служить установки, разработанные в СКБ аналитического приборостроения [Л. 11-12]. Стационарный гигростат с полезным объемом 0,3 $м^3$ построен на базе климатической камеры и позволяет получать относительную влажность 30—85%. Переносный гигростат предназначен для поверки гигрометрических датчиков непосредственно в условиях эксплуатации. В гигростате отсутствует система термостатирования; вентилятор перемешивает воздух в рабочем объеме. Установление температурно-влажностного режима длится 30—90 *мин* в зависимости от температуры и влажности окружающего воздуха.

Значительно реже, чем растворы солей, применяют водные растворы серной кислоты. Их основным недостатком является агрессивность; иногда эти растворы оказывают разрушающее действие на объекты испытаний и вспомогательную аппаратуру. Было также установлено, что при гигротермическом увлажнении некоторых полупроводниковых материалов над растворами H_2SO_4 имела место адсорбция молекул кислоты на поверхности

Таблица 11-2

Массовая концентрация (масса H_2SO_4 на 100 г раствора), %	Плотность раствора при 20°С, г/см³	Относительная влажность воздуха, %, при температуре, °С					
		0	20	25	30	50	75
10	1,0661	95,9	95,6	95,6	95,6	95,6	95,6
20	1,1394	87,8	88,0	88,0	88,0	88,2	88,5
25	1,1783	81,8	82,4	82,5	82,6	83,1	83,6
30	1,2185	73,8	75,0	75,2	75,4	76,2	77,2
35	1,2599	64,6	66,0	66,3	66,6	67,9	69,5
40	1,3028	54,2	56,1	56,5	56,9	58,5	60,5
45	1,3476	44,0	45,6	46,1	46,6	48,5	50,8
50	1,3951	33,6	35,2	35,7	36,2	38,3	41,0
55	1,4453	23,5	25,3	25,8	26,3	28,5	31,1
60	1,4983	14,6	16,1	16,6	17,1	19,0	21,4
65	1,5533	7,8	9,2	9,7	10,1	11,8	14,0
70	1,6105	—	3,4	3,7	4,1	5,4	7,2

твердого вещества. В табл. 11-2 [Л. 11-13] приведены данные о растворах H_2SO_4; в цитируемой работе содержатся также данные о водных растворах глицерина, нашедших более ограниченное применение.

Генераторы влажности двухтемпературные и на принципе двух давлений представляют собой динамические системы, в которых циркулирует единый поток воздуха.

Воздух насыщается в увлажнителе (сатураторе) при определенных значениях температуры и давления; до поступления в рабочую камеру изменяют один из этих параметров без изменения абсолютной влажности воздуха и, таким образом, получают заданное значение относительной влажности.

Принцип устройства двухтемпературного генератора показан на рис. 11-3,*а*. Основными частями установки являются насыщающий увлажнитель *1* и рабочая камера *2*, термостатируемые в жидкостных ваннах термостатов *3* и *4*; непрерывную циркуляцию воздуха в замкнутой системе *1—2* создает воздушный насос *5*. При условии, что воздух полностью насыщается в увлажнителе при температуре t_1, повышение его температуры до t_2 создает в рабочей камере относительную влажность

$$\varphi = E_1/E_2,$$

где E_1, E_2 — упругости насыщенного пара при температурах соответственно t_1 и t_2.

Если полные давления в увлажнителе (p_1) и рабочей камере (p_2) неодинаковы, формула для определения φ принимает вид:

$$\varphi = \frac{E_1}{E_2} \frac{p_2}{p_1}, \qquad (11\text{-}2)$$

Известны различные способы реализации описанного принципа. В установке НБЭ для регулирования темпера-

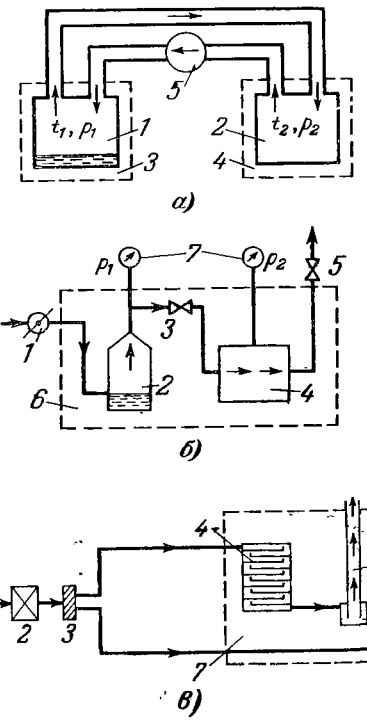


Рис. 11-3. Блок-схемы генераторов влажности.

а — двухтемпературного; *б* — на принципе двух давлений; *в* — со смешением двух потоков воздуха.

туры рабочей камеры вместо термостата применены электрические нагреватели потока воздуха. Для получения нескольких значений φ использовались установки с несколькими сатураторами, термостатируемыми при

различных температурах. Переключение сатураторов, осуществляемое с помощью быстродействующих клапанов, позволяет уменьшить инерционность установки, однако ее конструкция сильно усложняется. В некоторых установках вместо воды были применены ненасыщенные водные растворы гигроскопических солей (LiCl и др.) Это позволяет получать смеси с равновесной влажностью, более низкой чем при применении воды; устраняется также опасность выпадения конденсата на стенках аппаратуры. Однако в этом случае для контроля влажности смеси необходимы измерительные приборы, что лишает генераторы влажности их основного преимущества. В обычных двухтемпературных генераторах пределы φ определяются температурой сатуратора и, в известной мере, скоростью воздушного потока v, от которой зависят тепловые потери. При высоких значениях v приходится вводить поправку к значению φ, определенному по формуле (11-2); для $v=5$ *м/сек* величина поправки равна 0,6% φ.

Точность получения заданного значения влажности определяется погрешностями измерения температур и их постоянством в сатураторе и рабочем объеме генератора. Источниками погрешностей являются градиенты температуры, сорбция влаги стенками аппаратуры и, особенно, неполное насыщение воздуха в сатураторе. Метод двух температур непригоден для температурных испытаний гигрометров из-за невозможности получения различных значений температуры при постоянном значении φ. Основным его недостатком является значительная длительность (30—60 *мин*) перехода от одного значения φ к другому, обусловленная тепловой инерцией отдельных элементов.

От указанного недостатка свободны установки с изменением давления воздуха. Воздух достигает состояния насыщения при повышенном давлении p_1, при последующем понижении давления до величины p_2 и сохранении постоянной температуры относительная влажность воздуха будет:

$$\varphi = p_2/p_1. \qquad (11\text{-}3)$$

С учетом отклонений свойств влажного воздуха от свойств идеального газа и потери части влаги при расширении значения φ можно определить с большей точностью (особенно при высоких давлениях p_1) по эмпири-

ческим формулам; одна из них имеет вид:

$$\varphi = \frac{p_2 (1 - kp_2 + k' p_2^2)}{p_1 (1 - kp_1 + k' p_1^2)}, \qquad (11\text{-}4)$$

где k и k' — постоянные ($k' \ll k$).

Величина p_2 часто равна атмосферному давлению; если при этом $p_1 \leqslant 10$ *кгс/см*^{2}, поправочный множитель к формуле (11-3), вычисленный из (11-4), отличается от единицы не больше чем на 0,0025.

Схема установки показана на рис. 11-3,*б*. Воздух поступает через регулятор давления *1* в насыщающий увлажнитель *2*, а затем через дроссельный кран *3* в рабочую камеру *4* и через вентиль *5* выбрасывается в атмосферу или отсасывается насосом. Части установки *2*, *3* и *4* термостатированы в жидкостной ванне *6*. Давление в увлажнителе и рабочей камере измеряют при помощи манометров *7*.

Диапазон изменения относительной влажности у генераторов на принципе двух давлений обычно равен от 5—10 до 98%. Получение низких влагосодержаний сопряжено с некоторыми трудностями. Для получения $\varphi \leqslant 5\%$ был разработан «гибридный» генератор, сочетающий принципы двух температур и двух давлений. В этой установке увлажнитель работает при температуре более низкой (примерно на 22 °С), чем рабочая камера; нижний предел φ был доведен до 1%.

Время установления в обычных генераторах на принципе двух давлений не превышает 10—15 *мин*. Их точность зависит от погрешностей измерения давлений и точности поправок на отличие от идеальных газов. Кроме того, сохраняют свое значение и факторы, указанные для «двухтемпературного» метода. По мнению многих исследователей, при выборе образцовых поверочных средств генератору на принципе двух давлений следует отдать предпочтение перед двухтемпературным.

Гигростаты на принципе смешения двух потоков воздуха — полностью осушенного и увлажненного до насыщения — позволяют получать различные значения влажности путем изменения количественного отношения этих потоков. В установке такого типа (рис. 11-3,*в*) атмосферный воздух подается воздушным насосом *1* в осушитель *2*. Поток воздуха с влажностью $\varphi = 0$ разделяется смесительным дозирующим краном *3* на две части с определенным соотношением расходов.

Первый поток поступает в сатуратор *4*. Насыщенный воздух поступает в смеситель *5*, где смешивается со вторым потоком полностью осушенного воздуха. Воздушная смесь подается в камеру *6*, где омывает испытуемый объект, а затем выходит в наружную атмосферу. Увлажнитель, смесительная и рабочая камеры термостатируются с помощью термостата *7;* в жидкостную ванну термостата помещены также теплообменные змеевики, через которые сухой и насыщенный воздух подаются в смеситель. Таким образом, увлажнение воздуха и работа смесителя и рабочей камеры происходят при одинаковой температуре, которой соответствует определенная величина E упругости насыщенного водяного пара. Если обозначить через x ту часть общего потока воздуха, которая проходит через увлажнитель, а влагосодержание увлажненного воздуха — через $d_н$, то влагосодержание воздуха в рабочей камере будет:

$$d = x d_н.$$

Относительная влажность воздуха в камере

$$\varphi = \frac{xp}{p_н - E(1-x)}, \qquad (11\text{-}5)$$

где p, $p_н$ — давления влажного воздуха соответственно в рабочей камере и увлажнителе.

Если перепад давления между увлажнителем и рабочей камерой, сообщающейся с атмосферой, незначителен, можно принять $p_н = p = B$ (B — атмосферное давление). При испытаниях в области отрицательных температур значение E ничтожно мало по сравнению с атмосферным давлением.

В этих условиях уравнение (11-5) упрощается и принимает вид:

$$\varphi = x.$$

Выравнивание давлений в обеих ветвях установки осуществляется с помощью регулируемых дросселей и дифференциального манометра или ротаметра.

Важнейшим элементом гигростатов данного типа является дозирующий кран. В наиболее совершенных установках кран имеет 6—7 фиксированных положений, позволяющих осуществить вручную ступенчатое регулирование расхода. Точность гигростатов определяется погрешностями регулирования отношения массовых расходов потоков сухого и насыщенного воздуха, а также погрешностями от неполноты насыщения и осушки этих

потоков. Точность связанного регулирования обоих расходов зависит от степени стабилизации давления за дозирующим клапаном; погрешность, связанная с допущением $p_н = B$, растет с увеличением скорости воздуха. По указанным причинам динамический метод смешения не может обеспечить высокой точности получения паровоздушных смесей, особенно в широком диапазоне температур; он не был включен в рассмотренную поверочную схему. Однако на этом методе основаны некоторые достаточно совершенные гигростаты с контрольным гигрометром.

Рассмотренные выше генераторы влажности предназначены в основном для диапазонов средних и высоких влагосодержаний. Для поверки и градуировки гигрометров для малых и микровлагосодержаний необходимы специфические образцовые методы и установки. Для получения парогазовых смесей нашли применение диффузионные дозаторы динамического типа с диффузией водяного пара через цилиндрическую трубку или через пористую перегородку. Параметрами, определяющими количество пара, диффундирующего через трубку, являются скорость газа и его температура. В установке этого типа [Л. 11-14] можно изменять расход воздуха или температуру водяного термостата; первый способ обеспечивает более высокое быстродействие генератора. Была установлена необходимость искусственного старения трубок из пластика. В диапазоне влагосодержаний от 25 до $1\,000 \cdot 10^{-6}$ относительная погрешность генератора (определенная с помощью эталона НБЭ) находилась в пределах 2—5%.

Основным элементом диффузионных генераторов с пористой перегородкой является камера, разделенная на две части паропроницаемой мембраной. Через верхнюю часть непрерывно проходит поток сухого воздуха, а нижняя частично заполнена водой. Влажность потока воздуха зависит от его скорости и температуры в камере.

В установке, описанной в [Л. 11-15], применены мембраны из целофановой, полиэтиленовой или золотобитной пленки. Расход воздуха стабилизирован с помощью регулятора с критическим соплом, а упругость водяного пара воздуха над перегородкой регулируют изменением температуры воды с помощью электрического нагревателя.

Одним из образцовых приборов поверочной схемы является пневматический мост, представляющий

собой сорбционный гигрометр с критическим соплом. Известно, что при истечении газа через сопло существует критическое значение отношения давления на выходе (в горловине сопла) к давлению на входе (для воздуха это значение близко к 0,5), при котором скорость движения газа в сопле достигает звуковой и расход газа определяется только входным давлением и температурой, но не зависит от давления на низкой стороне.

Основной частью гигрометра являются две группы сопл, работающих в режимах критического расхода и имеющих диаметр горловины, близкий к 1 *мм*. Сопла *1—4* собраны по схеме (рис. 11-4), аналогичной четырехплечему мосту, в котором они являются аналогами пле-

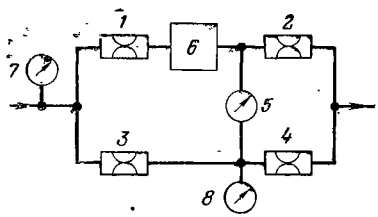


Рис. 11-4. Блок-схема гигрометрического пневматического моста.

чевых сопротивлений, а измерительным прибором служит дифференциальный манометр *5*. Сопла *1, 2*, между которыми включен осушитель *6* с твердым сорбентом, образуют измерительную ветвь моста, сопла *3, 4* — его опорную ветвь. Манометры *7* и *8* измеряют давления на входе моста и в средней точке опорной ветви. Мост может быть построен и по другим схемам [Л. 11-16]; в практическом исполнении он представляет собой термостатируемый блок из нержавеющей стали, а воздушный поток создается с помощью вакуум-насоса.

Принцип действия моста основан на изменении параметров исследуемого газового потока в результате его осушки, вызывающем изменение перепада давлений Δp в измерительной диагонали.

Если упругость водяного пара e не превышает 22 *мм рт. ст.*, получают простую линейную зависимость

$$e=\beta\Delta p,$$

где β — эмпирическая постоянная, значение которой зависит от параметров моста.

Упрощенные рабочие меры и контрольные средства используются для поверки гигрометров непосредственно в условиях эксплуатации. В первую очередь возникает необходимость поверки датчиков, так как для испытаний измерительных устройств можно использовать образцовые меры выходной величины датчика — сопротивления, емкости и т. п. Роль контрольных средств особенно велика при эксплуатации гигрометрических датчиков (ЭГД), не обладающих стабильными градуировочными характеристиками и требующих периодической их проверки. В качестве таких средств можно использовать рассмотренные ранее переносные солевые гигростаты. При этом возникают, однако, затруднения, связанные с приготовлением и заменой жидких солевых растворов. Удобнее применять эти растворы в виде кашицы; опыт показал, что при этом сохраняется значение упругости водяного пара над водным насыщенным раствором соответствующей соли.

Лучшее решение задачи дают смеси (обычно бинарные) тонко измельченных и высушенных твердых гидратов (или гидрата и ангидрида) гигроскопических солей. Упругость водяных паров над такой системой постоянна при условии постоянства температуры. Газ, не вступающий в реакцию с системой и находящийся в тигротермическом равновесии с ней, имеет влажность φ_p, определяемую только этой упругостью, температурой и полным давлением газа.

В [Л. 11-17] приведен перечень 10 бинарных смесей со значениями φ_p от 2,7 до 81% при +25 °С.

Особый интерес представляет применение рассмотренных систем для поверки гигрометров в области очень малых влагосодержаний. Смесь $Mg(ClO_4)_2 \times \times 4H_2O + Mg(ClO_4)_2 \cdot 6H_2O$ была использована для поверки кулонометрических гигрометров. Температура влияет на φ_p гидратных смесей значительно сильнее, чем у водных солевых растворов; это вызывает необходимость достаточно точного измерения или стабилизации температуры.

В отдельную категорию можно выделить установки для экспериментального определения динамических характеристик гигрометров. Такого рода установки предназначены для создания типовых возмущений (изменений влажности) с целью регистрации реакции гигрометра (чаще его датчика) на

воздействие определенного вида. Как было показано во второй части книги, датчики гигрометров в большинстве случаев можно аппроксимировать элементарными линейными звеньями. В связи с этим чаще всего ограничиваются получением ступенчатой переходной характеристики, по которой можно определить параметры и остальные динамические характеристики датчика. Значительно реже в рассматриваемых установках создают возможность образования воздействий типа импульсной или гармонической функции времени.

Требования, предъявляемые к установкам для определения статических и динамических характеристик гигрометров, различны. Для первых (рассмотренных выше) важнейшим показателем качества является остаточная погрешность влажности создаваемой парогазовой смеси. В установках для динамических испытаний допустимы значительно бо́льшие погрешности установившихся значений влажности. Первостепенное значение приобретает сохранение формы и параметров реализуемой функции времени, в частности мгновенного характера скачкообразного или импульсного изменения влажности. Кроме того, необходимо стабилизировать наиболее существенные внешние воздействия — температуру и скорость парогазовой смеси. Установки этого типа применяют также для искусственного старения гигрометрических датчиков по заданной программе.

Для динамических испытаний использовались или были специально разработаны установки, основанные на различных принципах, рассмотренных выше.

Генераторы влажности в виде рециркуляционных систем с двумя или несколькими увлажнителями позволяют получать ступенчатые изменения влажности при условии применения переключающего устройства, обладающего достаточным быстродействием.

Как уже указывалось, генераторы с двумя давлениями являются менее инерционными, чем двухтемпературные.

Скачкообразное возмущение можно получить также механизированным перемещением объекта исследования из одного канала в другой [Л. 0-7]. Простая установка с двумя насыщенными растворами различных солей описана в [Л. 11-18].

Наиболее просто осуществляется ступенчатое изменение влажности в описанных выше гигростатах на

принципе смешения двух потоков воздуха. Для этого достаточно изменить положение дозирующего крана; с учетом времени, необходимого для уравновешивания давления в обеих ветвях системы с помощью дросселирующих клапанов, длительность переходного процесса при ручном управлении и малом объеме рабочей камеры не превышает нескольких секунд.

На указанном принципе основана установка, разработанная Ф. Бернгардом специально для динамических испытаний [Л. 11-19]. С помощью калиброванных капиллярных трубок с магнитными вентилями в каналах осушки и увлажнения можно получить большое число ступеней влажности с сохранением скоростей потоков, протекающих через увлажнитель и осушитель. Шаговый переключатель с переменной частотой включения позволяет реализовать периодические функции влажности — простые, трех- и шестиступенчатые прямоугольные волны, причем минимальный период квазисинусоидальной функции (12 ступеней) равен 1,2 *сек*.

11-3. МЕТОДЫ И ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ГРАДУИРОВКИ И ПОВЕРКИ ВЛАГОМЕРОВ

Градуировка и поверка влагомеров связаны с большими трудностями, чем эти же операции у гигрометров. Для твердых материалов отсутствуют эталоны влажности, а «стандартные образцы» влажности твердых материалов весьма трудно создать и еще труднее сохранить. Большинство методов определения влажности твердых тел и жидкостей, используемых в качестве образцовых, имеет меньшую точность, чем образцовые методы для газов. Для жидкостей возможно применение искусственных образцовых проб, аттестованных по влагосодержанию и представляющих собой образцы исследуемой жидкости — абсолютно сухие и заданного влагосодержания; последние получают точным дозированием абсолютно сухой жидкости и воды.

Методика приготовления и аттестации таких проб в виде водонефтяных эмульсий была разработана применительно к задачам поверки и градуировки электрических влагомеров для нефти [Л. 11-20]. Она состоит из нескольких операций, причем на каждом этапе изготовления оценивается возможная предельная погрешность, что позволяет выполнить расчетную аттестацию полученной смеси.

Полное удаление влаги из жидкости достигается одним или несколькими известными способами — перегонкой, центрифугированием, пропусканием через слой твердого сорбента (цеолитов). Аттестация полученной «абсолютно сухой» нефти должна выполняться достаточно точным методом.

Эту сухую нефть и воду дозируют по объему с помощью мерных емкостей, исходя из требуемых количества и влагосодержания пробы. Дальнейшим этапом является эмульгирование смеси с помощью механических диспергаторов, обеспечивающих диспергирование воды до величины дисперсных частиц, не превышающей 10 *мкм*. Полученные эмульсии неустойчивы и должны использоваться в течение 5 *мин*. Они не могут длительно храниться или транспортироваться, т. е. не являются стандартными образцами; таким образцом может служить только аттестованная абсолютно сухая проба.

Поверка влагомеров для нефти по аттестованным искусственным эмульсиям предусмотрена ГОСТ 14203-69, причем влагосодержание эмульсий должно быть определено с точностью, в 2,5 раза превышающей точность влагомера.

Предложенная для диэлькометрических нефтяных влагомеров поверочная схема [Л. 11-21] исходит из принципа раздельной поверки электрических и влажностных характеристик влагомера.

Для твердых материалов до настоящего времени нет общей единой поверочной схемы. Были разработаны и предлагались лишь отдельные образцовые методы и средства, не являющиеся универсальными, а предназначенные для определенных материалов или групп материалов. В первую очередь такие методы были разработаны для зерна различных культур и продуктов его переработки. Это объясняется массовым характером определений влажности зерна, широким распространением зерновых электровлагомеров и большим экономическим значением их точности.

Образцовый вакуумно-тепловой метод, предложенный ВНИИ Комитета стандартов (ВНИИК) [Л. 11-22], построен на принципе двухступенчатого высушивания в электрическом сушильном шкафу. Из образца зерна отбираются четыре навески по 10 *г*, которые помещаются в двухъярусные бюксы, снабженные размалывающим механизмом. Такие бюксы применены с целью исключе-

ния погрешностей, обусловленных потерями влаги и сухого вещества при измельчении и перемещении навески. Первая ступень процесса заключается в сушке целого зерна при температуре 105°С в течение 30 *мин.* На второй стадии после размола подсушенной навески непосредственно в бюксе навески зерна подвергаются сушке в вакуумном сушильном шкафу при температуре 130°С, остаточном давлении 5—10 *мм рт. ст.* и непрерывной откачке выделяющихся паров; разрежение создается форвакуумным насосом. Температура на уровне полки, на которой устанавливаются бюксы, поддерживается постоянной с точностью до ±0,3°С.

Градиент температур между отдельными гнездами для бюкс на полке не превышает 0,5°С. Влажность определяется по результатам взвешивания на аналитических весах с чувствительностью 0,1 *мг.*

ВНИИК считает, что хорошая воспроизводимость результатов определения может быть достигнута не только сушкой до постоянного веса, но и при высушивании при температуре 130°С в течение 1 *ч.* Такой режим дает результаты, эквивалентные вакуумной сушке в течение 5 *ч* при 100°С.

Последний режим принят в ряде стран (США, Франция, Канада и др.). Этот метод (при экспозиции в 1 *ч*) имеет следующие показатели: отклонение от среднего значения результатов определения для одного и того же образца зерна (10—12 параллельных и последовательных определений) не превышает ±0,05% влажности. Среднеквадратичное отклонение от среднего значения находится в пределах 0,02—0,04%. Вариация значения влажности внутри данного ряда измерений составляет 0,1% влажности.

Аналогичные образцовые методы для зерна были созданы и в других странах. По методу, разработанному в ФРГ [Л. 11-23] определение влажности зерна (пшеницы и ржи) производится высушиванием в вакуумном шкафу при температуре 100 ±2°С и остаточном давлении 20±3 *мм рт. ст.* в течение 180±5 *мин.*

Вакуумно-тепловой метод и основанные на этом методе установки (ОВЗ-1) не свободны от некоторых недостатков метода высушивания (см. § 1-3). В связи с этим в СССР и за рубежом продолжаются работы по изысканию образцовых методов для зерна и других твердых материалов.

В качестве эталонного метода можно использовать титрование реактивом К. Фишера (см. § 1-3). Ф. В. Гордина исследовала эту возможность применительно к зерну и муке [Л. 11-24]. Экстрагентом служил метиловый спирт, а оптимальным способом определения эквивалентной точки оказался электрометрический. Была разработана установка для размола зерна (длительность измельчения навески 5 *г* составляет 2—2,5 *мин*); экстракции воды (длительность 10 *мин*) и отбора пробы экстракта; конструкция установки преследует цель исключения потерь влаги в ходе перечисленных операций.

Общая относительная погрешность метода складывалась из погрешностей приготовления образца δ_1, экстракции воды δ_2 и титрования δ_3:

$$\delta = \sqrt{\delta_1^2 + \delta_2^2 + \delta_3^2}.$$

Анализ составляющих общей погрешности привел к величине $\delta = 0{,}24\%$, что для зерна в диапазоне влажности 8—35% соответствует абсолютной погрешности меньше 0,1% влажности.

Метод, аналогичный рассмотренному, разрабатывался не только для зерна, но и для бумаги, хлопкового волокна и древесины в Центральном управлении мер и качества ПНР [Л. 11-25]. Расхождения результатов определения методами Фишера и высушивания составляли $\pm 0{,}1 \div 0{,}2\%$ влажности.

С использованием метода реактива Фишера в [11-24] была предложена поверочная схема для зерновых влагомеров; на рис. 11-5 приведена эта схема с указанием величины погрешностей δ ее элементов.

Ввиду отсутствия стандартных образцов влажности твердых материалов для градуировки влагомера в единицах влажности и для поверки необходим набор образцов с различными значениями влагосодержаний. Подготовка таких «искусственных проб» является трудоемкой и ответственной операцией, от которой в значительной степени зависит точность градуировки или поверки.

Если исходный материал имеет высокую влажность, набор образцов готовят посредством сушки; сухой исходный образец приходится увлажнять. На практике в процессе градуировки применяются оба процесса. Для сохранения постоянства влажности образцов

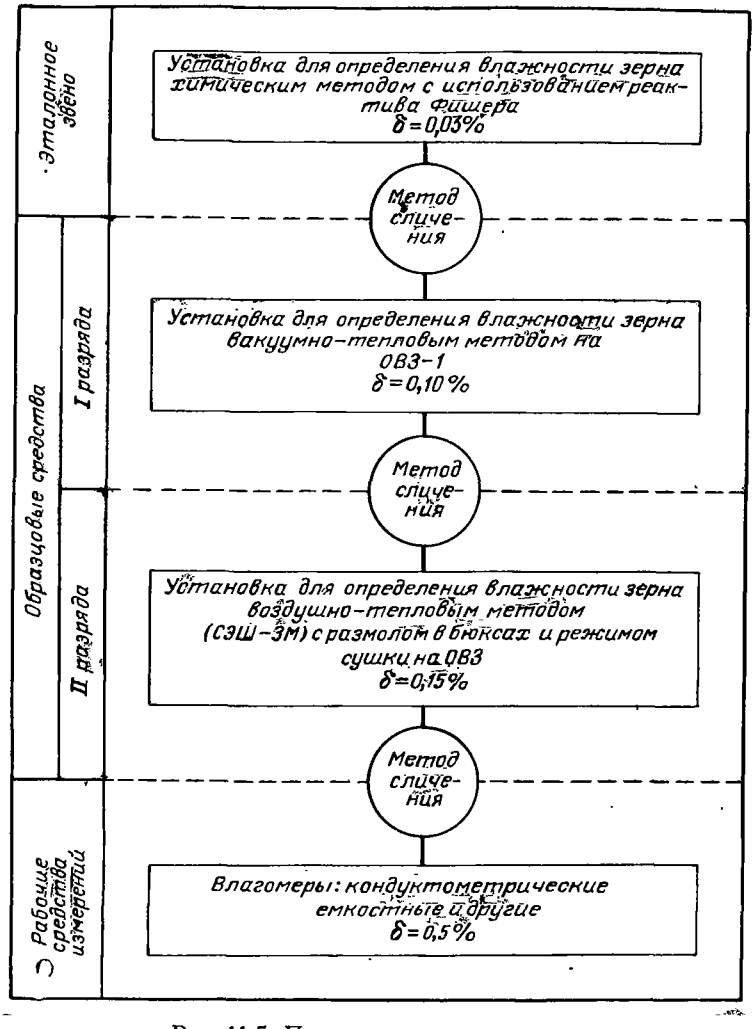


Рис. 11-5. Поверочная схема для зерновых влагомеров.

их необходимо хранить в герметичных сосудах или оболочках (металлические сосуды, стеклянные банки с притертыми пробками, мешочки из синтетических негигроскопических материалов и т. п.). Объем воздуха, не заполненный материалом внутри оболочки, должен быть минимальным.

Можно применить следующие способы искусственного увлажнения: а) смешивание более влажного материала с менее влажным; б) непосредственное (гидротермическое) увлажнение погружением образца в воду или механическим введением влаги, в частности тонко распыленной; в) гигротермическое увлажнение в атмосфере с различной влажностью.

Первый, наиболее простой способ требует длительной выдержки после смешивания; даже при этом условии трудно достигнуть полного выравнивания влажности образца.

Погружением в воду нельзя получить нужное, заранее заданное значение влажности. При механическом добавлении воды, если известна исходная влажность образца, можно определить количество воды, добавляемой для получения нужной влажности, по формуле

$$B = B_0 \left(\frac{100 - W_0}{100 - W} - 1 \right),$$

где B — масса добавляемой воды; B_0 — исходная масса образца; W_0 — исходная влажность, %; W — нужная (конечная) влажность, %.

Увлажнение гигроскопического материала водой без ее распыления лучше всего производить, помещая образец материала вместе с нужным количеством воды в плотно закрытый барабан из влагостойкого материала (цилиндрический сосуд из органического стекла) и непрерывно вращая барабан до полного поглощения влаги. Этот же способ обеспечивает достаточно равномерное распределение влаги в образце после его увлажнения любым способом. Выдерживание увлажненного образца в закрытом сосуде при непрерывном вращении сокращает продолжительность увлажнения и обеспечивает более равномерное распределение влаги.

Увлажнение распылением производится с помощью пульверизаторов, дающих возможно более тонкое распыление; следует следить за равномерностью распыле-

ния. Учитывая неизбежные потери влаги, при увлажнении распылением рекомендуется увеличивать количество воды на 10—15% по сравнению с расчетной величиной.

Наилучшие результаты дает увлажнение образцов в воздухе с различной относительной влажностью. Если известны сорбционные изотермы данного материала, можно получить образцы заданной влажности с достаточно большой точностью. При этом появляется возможность сохранить постоянную влажность этих образцов в течение длительного времени. Ограничением этого способа является возможность его использования только в пределах гигроскопического состояния материала, т. е. при влагосодержаниях ниже максимального гигроскопического. Для получения образцов с более высокой влажностью приходится применять механическое введение воды.

Гигротермическое увлажнение образцов твердых материалов осуществляется в камерах-гигростатах любых типов; проще всего применять солевые гигростаты (см. § 11-2) или просто закрытые емкости (эксикаторы, стеклянные банки с притертыми пробками и т. п.) с растворами солей.

Достижение равновесия ускоряется перемешиванием или созданием циркуляции воздуха внутри емкости. Исходные образцы для приготовления «искусственных проб влажности» по своим физическим и физико-химическим свойствам (химический и гранулометрический состав, наличие примесей, плотность и т. д.) должны быть достаточно представительными для материала в целом. Градуировку влагомеров, предназначенных для автоматического контроля материалов, целесообразно выполнять на образцах, отбираемых непосредственно в реальных условиях работы влагомера, например из производственного потока. При этом число измерений должно быть достаточно большим и охватывать весь диапазон влажности, соответствующий пределам шкалы влагомера. Образцы, отобранные в производственных условиях, обычно не соответствуют последнему требованию, в связи с чем приходиться использовать «искусственные пробы». Значения температурных поправок обычно определяют в процессе градуировки.

Контрольные рабочие меры электрических величин можно использовать для поверки и градуировки измерительных устройств электрических влагомеров,

рассматриваемых как измерители омического сопротивления или емкости (полного сопротивления). Такими мерами могут служить полупеременные или переменные воздушные конденсаторы высокой добротности, шунтированные безреактивными сопротивлениями; величины емкости и сопротивления должны соответствовать емкости и $\operatorname{tg}\delta$ датчика с материалом. Необходимо помнить, что электрические цепи, состоящие из мер сопротивления и емкости, не являются физической моделью датчика и лишь в ограниченной степени воспроизводят его электрические свойства. Так, например, частотная характеристика образцового сопротивления совершенно иная, чем у активной составляющей емкостного датчика с материалом.

11-4. ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ПОЛУЧЕНИЯ ИНФОРМАЦИИ О ВЕЛИЧИНАХ, СВЯЗАННЫХ С ВЛАЖНОСТЬЮ

Для исследования ряда процессов и создания высококачественных систем управления ими необходимо получение информации не только о влажности материалов и окружающей их среды (воздуха), но и о других величинах, являющихся производными от влажности или же связанных с ней; для этого используют методы измерения, описанные в предыдущих главах.

Датчики и приборы данной категории можно разделить на следующие группы:

а) средства измерения градиентов влажности газов и твердых материалов;

б) устройства для дифференцирования величины влажности (измерения производной влажности по времени);

в) устройства для совокупных измерений влажности и других, связанных с ней величин;

г) средства измерения физических величин, технических и экономических показателей, связанных функциональной зависимостью с влажностью.

Необходимость в измерениях градиентов (перепадов) влажности воздуха в пространстве возникает при аэрологических исследованиях (измерение вертикальных градиентов воздуха), исследованиях процессов сушки, интенсивности испарения, теплового баланса поверхности почвы и т. д.

Известны градиентомеры влажности воздуха, основанные на применении психрометрического метода.

Принцип действия этих приборов основан на зависи-

мости градиента упругости водяного пара Δe от показаний двух психрометров, вытекающей из психрометрической формулы (7-1):

$$\Delta e = \Delta E_м + Ap\Delta t_м - Ap\Delta t_с, \qquad (11\text{-}7)$$

где $\Delta t_с$, $\Delta t_м$ — разность температур сухих и мокрых термометров; $\Delta E_м$ — разность значений упругостей насыщенного пара при температурах мокрых термометров; p — атмосферное давление; A — психрометрический коэффициент.

Соотношение (11-6) осуществляется различными способами. Известные градиентомеры с сухими и увлажненными проволочными термометрами сопротивления, например описанный в [Л. 11-26], имеют измерительную схему, содержащую несколько мостов, и отличаются сложностью и громоздкостью.

От указанных недостатков в значительной мере свободны психрометрические градиентомеры с термисторами [Л. 7-5].

Автор разработал автоматический прибор для контроля разности значений абсолютной влажности воздуха в двух точках [Л. 11-27] с применением электролитических подогревных датчиков. Прибор имеет простую конструкцию (используется всего два датчика) и может применяться для непрерывных измерений.

Измерительная схема представляет собой уравновешенный мост. Плечи R_1 и R_2 содержат термометры сопротивления датчиков, установленных в контролируемых точках. Между смежными плечами R_1 и R_2 включен уравновешивающий реохорд. Как было показано в § 7-1, такой мост является дифференциальным. Обозначим через x относительное перемещение движка реохорда и через R — сопротивление постоянных плеч моста.

Условием равновесия моста является

$$x = 0{,}5 - 0{,}5\,\frac{R_2 - R_1}{R}.$$

Уравнение шкалы моста показывает, что: а) перемещение движка реохорда прямо пропорционально разности сопротивлений обоих датчиков; б) $x=0{,}5$ для $R_1=R_2$, т. е. равенству сопротивлений датчиков соответствует положение движка в середине реохорда. Прибор, следовательно, позволяет измерять знакопеременные градиенты.

Градиентомеры для измерений в пограничных слоях

над поверхностями испарения (исследования в области массопереноса, биологии и т. п.) должны дополнительно удовлетворять требованию предельной миниатюризации датчиков во избежание возмущения полей влажности. Для этого удобно применять психрометры с миниатюрными термопарами (§ 7-1).

Контроль градиентов влажности в твердых материалах имеет большое значение для интенсификации процессов сушки; необходимо контролировать влажность в минимальных объемах внутри влажного материала («точечное измерение»).

Для этого можно применить кондуктометрические влагомеры с миниатюрными игольчатыми электродами. Датчик выполнялся, например, на базе медицинской иглы из нержавеющей стали с диаметром отверстия около 1,5 *мм*. Вторым электродом служила проволока (диаметром 0,3—0,5 *мм*), вводимая во внутреннюю полость иглы. Зазор между электродами заполнялся гидрофобным или гигроскопическим диэлектриком; в последнем случае измерение влажности основано на принципе гидротермического равновесия (см. § 10-2).

Градиентомер влажности древесины, разработанный в ЦНИИМОД [Л. 3-12], представляет собой кондуктометрический влагомер. Датчик прибора имеет несколько (до десяти) электродов в виде металлических игл с изолированными стержнями; токоведущими являются только их головки.

Электроды вводятся в отверстия, высверленные в древесине до различной глубины. Подключая к влагомеру с помощью переключателя различные пары игольчатых электродов, получают информацию о перепаде влажности между соответствующими слоями древесины.

Рассмотрим устройства для дифференцирования величины влажности. В обычные регуляторы производная от влажности по времени может вводиться в качестве форсирующего сигнала с целью улучшения качества регулирования. При автоматической оптимизации процессов сушки этот параметр может определять критерий оптимальности процесса.

Для указанной цели можно использовать автоматические влагомеры и гигрометры в сочетании с дифференциаторами непрерывного или дискретного действия. Однако в большинстве производственных процессов скорость изменения влагосодержания газов и особенно твер-

дых материалов весьма мала. Известно, что при дифференцировании медленно изменяющихся сигналов возникают значительные затруднения, обусловленные малым абсолютным значением производной по времени и неблагоприятным отношением полезного сигнала к помехам. В связи с этим для дифференцирования влажности были созданы специальные устройства.

Разработанное автором [Л. 11-27] устройство непрерывного действия для дифференцирования влажности твердых материалов имеет введенный в толщу материала обычный датчик электрического влагомера. Второй датчик — это электрический гигрометрический датчик, измеряющий влажность материала по методу гигротермического равновесия (см. § 10-2). Измерительные устройства преобразуют общую входную величину обоих датчиков — влагосодержание материала в напряжения U_1 и U_2. Вычитающее устройство (электронный дифференциальный усилитель) вычитает сигнал U_2 из U_1.

В [Л-1] показано, что при некоторых упрощающих допущениях устройство в целом можно рассматривать как идеальное дифференцирующее звено с передаточной функцией:

$$W(p) = k_1 k_3 p(\tau + T),$$

где k_1, k_3 — коэффициенты передачи влагомера и дифференциального усилителя; T, τ — постоянная времени и запаздывание второго датчика; p — оператор дифференцирования.

В совокупных измерениях влажности и других физических величин важнейшее место занимают измерения влажности и температуры. При кондиционировании воздуха в жилых и производственных помещениях характеристика комфортных условий для людей связана не только с температурой и относительной влажностью воздуха, но и со скоростью его движения и температурой окружающих поверхностей.

Однако был предложен ряд упрощенных уравнений для вычисления «термовлажностного показателя» ТН, служащего для оценки микроклимата в помещениях; например, одна из формул Бюро погоды США:

$$TH = t - 0{,}55(1 - \varphi)(t - 58),$$

где t — температура, °Ф; φ — относительная влажность в долях единицы.

Устройства для определения значения TH (этот показатель иногда называют «эффективной температурой»)

состоят из датчиков температуры и влажности и вычислительного устройства, основанного на том или ином уравнении. В большинстве случаев — это очень простые приборы с применением сухого и смоченного термометров (ртутно-стеклянных, манометрических, биметаллических) или термометра и датчика влажности с чувствительными элементами деформационного типа. Вычислительное устройство механического типа непосредственно перемещает указатель по шкале, градуированной в единицах *ТН*.

Значительно сложнее управлять производственными процессами по заданной программе, связывающей влажность материала с его температурой. Решение задачи этого типа для процесса активного вентилирования зерна описано в [Л. 11-28].

Прибор, измеряющий разность температур поверхности твердого материала и точки росы окружающего воздуха, позволяет осуществить автоматическую защиту от конденсации влаги на поверхности материала с целью предотвращения коррозии металлов, порчи строительных материалов или конструкций, упаковочных оболочек и т. п. При уменьшении указанной разности температур до заданного предела прибор приводит в действие устройства, подогревающие и осушающие воздух или поверхность материала. Информация об указанной разности температур используется также перед нанесением защитных покрытий различных видов на большие поверхности (например, судов, мостов, труб и т. п.) для увеличения долговечности этих покрытий.

На аналогичных принципах строятся устройства для автоматического оповещения о гололеде на автомобильных дорогах. Один датчик измеряет температуру дорожного покрытия, второй — влажность воздуха. При сочетании значений указанных параметров, соответствующем возможности возникновения гололеда, вычислительное устройство выдает извести тельный сигнал.

Системы предупреждения обледенения нужны также для аэродромных покрытий, железнодорожных стрелок, передающих антенн (радиолокационных и телевизионных) и других объектов. В них используют иногда кондуктометрические датчики поверхностной влажности, например копланарные с кольцевыми или гребенкообразными электродами. Рабочая поверхность датчика совпадает с поверхностью защищаемого объекта. Для

того чтобы датчик реагировал и на появление льда или сухого снега на этой поверхности, его снабжают электрическим нагревателем для расплавления твердых осадков и осушки датчика после срабатывания сигнализатора.

Результаты измерения некоторых параметров материалов зависят от их влагосодержания и в ряде случаев в соответствующих измерительных приборах целесообразно непрерывно и автоматически компенсировать влияние влажности. Однако такие компенсаторы влажности до настоящего времени применялись очень редко. Примером может служить измерительная система, позволяющая вести раздельный учет содержания чистой нефти и воды в нефтеводяной эмульсии, поступающей из скважины и имеющей высокое влагосодержание (до 70%) [Л. 11-29]. Система представляет собой сочетание импульсного объемного счетчика количества жидкости с диэлькометрическим влагомером непрерывного действия, имеющим проточный датчик на трубопроводе, по которому протекает нефть.

Устройства, относящиеся к группе, указанной в п. «г» (из перечисленных в начале этого параграфа), позволяют измерять некоторые физические величины, прямо или косвенно связанные с влажностью материалов.

Одной из таких величин является сосущая сила F (см. § 1-1), широко используемая при исследовании всех процессов переноса почвенной влаги и контроля влагообеспеченности растений; ее можно использовать и для других капиллярно-пористых материалов. Известно много методов и приборов для прямого и косвенного определения сосущей силы [Л. 11-30]. Важным требованием к ним является возможность работы в условиях полевых или естественного произрастания без отбора пробы исследуемого материала. Эта задача решается с помощью электрических гигрометров различных типов. В соответствии с формулой (1-2) измерение величины F (или $pF=\lg F$) сводится к измерению относительной влажности воздуха, находящегося в гигротермическом равновесии с объектом измерения. Некоторые исследователи применяли описанные в § 7-1 микропсихрометрические датчики с использованием эффекта Пельтье, устанавливаемые в миниатюрной измерительной камере. С использованием такой камеры объемом около 2,7 $см^3$ с уплотнением из эпоксидных смол измеряли, например,

сосущую силу на отдельных участках поверхности листьев растений [Л. 11-31].

Другим параметром почв и грунтов, который можно определить прямым измерением с помощью электрического влагомера, является их пористость в условиях естественного залегания. Зависимость между пористостью и электрическими параметрами рыхлых почв, насыщенных водой, описывается эмпирическими формулами, связывающими удельное сопротивление водонасыщенной почвы [Л. 11-32] или ее диэлектрическую проницаемость [Л. 3-14] с естественной пористостью. Техника измерений в полевых условиях описана в указанных работах.

Наименее разработана группа устройств, позволяющих на основании информации о влажности и других параметрах производственных или физических процессов вычислить некоторые экономические, технико-экономические и энергетические показатели этих процессов.

Предложенная автором для процессов сушки схема [Л. 11-33] использует описанный выше прибор для измерения разности влагосодержаний воздуха в двух точках. Объект сушки включен в разомкнутую циркуляционную систему, в которую вентилятор непрерывно нагнетает подогретый или подсушенный воздух, являющийся агентом сушки, или атмосферный воздух, который только перемещает удаленную влагу; в последнем случае для сушки может использоваться радиационная энергия, токи высокой частоты и т. п. Необходимо обеспечить отсутствие утечек воздуха из объекта.

Датчики непрерывно измеряют абсолютную влажность $a_{вх}$ и $a_{вых}$ воздуха на входе и выходе объекта, а выходной прибор измеряет разность $a_{вых}-a_{вх}$; одновременно расходомер измеряет расход q воздуха через контролируемый объект. Произведение $b=q(a_{вых}-a_{вх})$ равно мгновенному значению количества влаги, удаляемой в ходе сушки; эту величину вычисляет множительное устройство, а интегрирующий элемент позволяет определить количество влаги $B=\int_0^t q(a_{вых}-a_{вх})\,dt$, удаленное за время t.

Если одновременно измерять ваттметром, тепломером или другими приборами электрическую мощность или количество тепла, расходуемые на сушку, можно с по-

мощью одной из известных схем деления получить непрерывную информацию о важнейшем энергетическом показателе процесса сушки — удельных затратах электрической энергии или тепла на единицу массы удаляемой влаги.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

0-1. **Берлинер М. А.** Электрические измерения, автоматический контроль и регулирование влажности. М., «Энергия», 1965.

0-2. Влажность. Измерение и регулирование в научных исследованиях и технике. Л., Гидрометеоиздат, 1967—1969, т. 1—4.

0-3. Современные методы и технические средства измерения и регулирования влажности твердых материалов, жидкостей и газов, тематическая подборка статей.— «Приборы и системы управления», 1970, № 1.

0-4. **Спенсер-Грегори К., Роурке Е.,** Гигрометрия. М., Металлургиздат, 1963.

0-5. **Усольцев В. А.** Измерение влажности воздуха. Л., Гидрометеоиздат, 1959.

0-6. Humidity and moisture, measurement and control in science and industry (A. Wexler ed.), vol. 1—4. New York, Reinhold, 1965. (Неполный русский перевод, см. [Л. 0-2]).

0-7. **Lapiński M., Kostyrko K., Włodarski W.** Nowoczesne metody pomiaru i regulacji wilgotności, wyd. 2. Warszawa, WNT, 1968.

0-8. **Lück W.** Feuchtigkeit, Grundlagen, Messen, Regeln. München-Wien, R. Oldenbourg, 1964.

0-9. **Sonntag D.** Hygrometrie. Ein Handbuch der Feuchtigkeitsmessung in Luft und anderen Gasen. Lieferungen 1—6. Berlin, Akademie-Verlag, 1966—1968.

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ

В-1. **Гершкович Е. А.** Экономические аспекты организации метрологической службы в области измерений влажности.— В кн.: Новые спектральные методы и автоматические системы определения влажности (тезисы докладов). Фрунзе, «Илим», 1970.

В-2. **Мелкумян В. Е.** Измерение и контроль влажности материалов. М., Изд-во Комитета стандартов, 1970.

В-3. **Берлинер М. А.** Состояние и направления развития средств измерения и автоматического регулирования влажности за рубежом (обзор). М., ЦНИИТэнефтехим, 1967.

В-4. **Берлинер М. А.** Влагомеры СВЧ.— «Приборы и системы управления», 1970, № 1.

1-1. **Кучеров Я. М.** Разработка фотоабсорбционных анализаторов влагосодержания нефти на основе исследования оптических свойств водонефтяных эмульсий. Диссертация. Баку, 1970.

1-2. **Казанский М. Ф.** Анализ форм связи и состояния влаги, поглощенной дисперсным телом, с помощью кинетических кривых сушки.— «ДАН СССР», 1960, № 5.

1-3. **Гинзбург А. С., Дубровский В. П., Казаков Е. Д., Окунь Г. С., Резчиков В. А.** Влага в зерне. М., «Колос», 1969.

1-4. **Никитина Л. М.** Таблицы равновесного удельного влагосодержания и энергии связи влаги с материалами. М., Госэнергоиздат, 1963.

1-5. **Казанский В. М.** Применение термограмм и энергограмм сушки для определения влаги слабой химической связи с дисперсными телами.— ИФЖ, 1968, № 6.

1-6. **Попов Л. В.** Методы определения влажности почв. М., Изд-во АН СССР, 1960.

1-7. **Ларионов А. К., Алексеев В. М., Липсон Г. А.** Влажность грунтов и современные методы ее определения. М., Госгеолтехиздат, 1962.

1-8. **Клугман Ю. И. и Ковылов Н. Б.** Диэлькометрические нефтяные влагомеры (обзор). М., ВНИИОЭНГ, 1969.

1-9. **Митчелл Дж. и Смит Д.** Аквametрия. М., Изд-во иностранной литературы, 1952.

1-10. **Eberius E.** Wasserbestimmung mit Karl-Fischer Lösung. Weinheim, Verlag Chemie, 1954.

1-11. **Венедиктов М. В.** Выбор оптимального метода измерения влагосодержания в зависимости от различия состояния влаги в пористом веществе.— В ки.: Тезисы докладов конференции по совершенствованию методов определения влагосодержания. Киев, ВНИИАналитприбор, 1970.

2-1. **Кларк В. Л., Нудо А., Джин П.** Определение влагосодержания ракетного топлива.— В ки.: Влажность. Л., Гидрометеоиздат, 1968, т. 4.

2-2. **Grant E. H.** et al. Dielectric behaviour of water at microwave frequencies.— Jl Chem. Phys., 1957, № 1.

2-3. **Хиппель А. Р.** Диэлектрики и их применение. М., Госэнергоиздат, 1953.

2-4. **De Loor G. P.** Dielectric properties of heterogeneous mixtures, containing water. Jl Microwave Power, 1968, № 2.

2-5. **Берлинер М. А., Лелянов Б. Н., Иванов В. А.** Применение диаграммы Коул-Коула во влагометрии СВЧ.— «Известия вузов. Сер. Приборостроение». 1973, № 4.

2-6. **Клугман И. Ю.** Метрологическое обоснование диэлектрического метода измерения влажности нефти. Диссертация. Куйбышев, 1966.

2-7. **Palmer L. S.** On the dielectric constant of the water in wet clay. Proc. Phys. Soc., 1952, B65.

2-8. **Suresh N.** and oth. Microwave measurement of the degree of binding of water, absorbed in soils. Jl Microwave Power. 1967, № 4.

2-9. **Stuchły S.** Właściwości układów ciał stałych i wody w zakresie mikrofal. Praca doktorska. Instytut podstawowych problemów techniki. Warszawa, 1968.

2-10. **Худолей Л. Л.** Исследование электрофизических свойств сыпучих материалов с целью построения автоматических измерительных систем. Диссертация. Одесса, 1970.

2-11. **Романовский И. А.** Исследование электрических свойств влажных дисперсных тел в связи с различием форм связи влаги. Диссертация. Киев, 1969.

2-12. **Деревянко А. И.** Исследование электрических явлений в гетерогенных системах. Диссертация. Киев, 1969.

2-13. **Нетушил А. В., Жуховицкий Б. Я., Кудин В. Н. и Парини Е. П.** Высокочастотный нагрев диэлектриков и полупроводников. М., Госэнергоиздат, 1959.

2-14. **Кричевский Е. С., Тонкой Е. П.** Экспрессный метод получения частотных характеристик влажных материалов.— «Приборы и системы управления», 1968, № 2.

2-15. **Брандт А. А.** Исследование диэлектриков на сверхвысоких частотах. М., Физматгиз, 1963.

2-16. **Stuchly S.** Dielectric properties of some granular solids containing water.— JI Microwave Power, 1970, № 2.

2-17. **Stéru M.** Contributions au développement de la mesure électrique de l'humidité des matériaux. «Acta IMEKO» 1967 T. 3. Budapest, 1968.

2-18. **Казанский В. В.** Исследование диэлектрических свойств, методов и средств измерения влажности хлопка-сырца. Диссертация. Ташкент, 1970.

2-19. **Дущенко В. П., Романовский И. А., Оленко Я. В., Побережец И. И.** Влияние формы связи влаги на диэлектрические свойства целлюлозы.— ИФЖ, 1971, № 4.

2-20. **Берлинер М. А., Иванов В. А.** Характеристики влагомеров сверхвысоких частот.— «Приборы и системы управления», 1967, № 3.

2-21. **Демьянов А. А.** Исследование диэлектрических параметров нефти и ее фракций в диапазонах сантиметровых и миллиметровых волн с целью создания влагомеров. Диссертация. М., 1969.

3-1. **Кричевский Е. С.** Теоретические основы и анализ систем высокочастотного контроля влажности при обогащении полезных ископаемых. Диссертация. Л., 1968.

3-2. **Эме Ф.** Диэлектрические измерения. М., «Химия», 1967.

3-3. **Lindrum W.** Wassergehaltsbestimmung von Braunkohle. ATM, 1962, № 314.

3-4. **Лапшин А. А.** Электрические влагомеры. М., Госэнергоиздат, 1960.

3-5. **Балюбаш В. А.** Исследование характеристик молочных продуктов применительно к задачам контроля влажности. Диссертация. Л., 1970.

3-6. **Ковылов Н. Б.** К расчету точности изготовления емкостных датчиков влажности.— «Приборы и системы управления», 1968, № 1.

3-7. **Влодавец И. Н. и Берлинер М. А.** Прибор для автоматического контроля содержания влаги в масле.— «Молочная промышленность», 1951, № 6.

3-8. **Усиков С. В.** Расчет емкостных бесконтактных преобразователей.— В кн.: Методы исследования электрофизических свойств и процессов переноса в электролитах и диэлектриках. М., «Химия», 1967.

3-9. **Грицай В. И. и Цапив И. И.** Выбор размеров просыпного датчика электрических высокочастотных влагомеров емкостного типа.— В кн.: Контрольно-измерительная техника. Львов, 1966, № 2 (Изд-во Львовского университета).

3-10. **Shufflebotham K.** Английский патент, кл. 37, № 885306, 20/XII 1961.

3-11. **Берлинер М. А. и Соколов В. С.** Определение влажности угольной пыли электрическим влагомером.— «Электрические станции», 1954, № 11.

3-12. **Познаев А. П.** Измерение влажности древесины. М., «Лесная промышленность», 1965.

3-13. **Skarbiński M., Gwiazdowski S., Włodarski W.** Польский патент, кл. 421, № 57.287, 25.04.69.

3-14. **Черняк Г. Я.** Диэлектрические методы исследования влажных грунтов. М., «Недра», 1964.

3-15. **Фримштейн М. И.** Закладные датчики локального влагосодержания для измерения полей влажности.— «Приборы и системы управления», 1970, № 1.

3-16. **Stephan W., Schimmel P.** Патент ГДР, кл. 421, 9/51, № 59.634, 05.04.68.

3-17. **Берлинер М. А. и Смирнов С. М.** Автоматический контроль и регулирование в кожевенной промышленности. М., Гизлегпром, 1958.

3-18. **Берлинер М. А.** Авторское свидетельство № 79.164.— «Бюллетень изобретений», 1950, № 3.

3-19. **Берлинер М. А.** Электрический прибор для определения влажности строительных конструкций и материалов.— В кн.: Материалы и конструкции. М., Изд-во Академии архитектуры СССР, 1949.

4-1. **Берлинер М. А., Долгополов Н. Н.** Электрометрическое определение солесодержания почв, грунтов и грунтовых вод. М., Изд-во АН СССР, 1954.

4-2. **Дубровний В. П.** Про вибір параметрів схеми для випрямлеиия шкали приладів що працюють з логарифмічними датчиками.— «Автоматика» (Київ), 1962, № 6.

4-3. **Roberts M. H.** Английский патент, класс G1N, № 1.138.224, 27.12.68.

4-4. **Волков Б. М.** Логарифмические усилители. Киев, Гостехиздат, 1963.

4-5. **Эпштейн С. Л.** Измерение характеристик конденсаторов, М., «Энергия», 1965.

4-6. **Полулях К. С.** Электронные резонансные измерительные приборы. Изд-во Харьковского университета, 1961.

4-7. **Маркелов А. А.** Исследование некоторых емкостных систем для измерения влажности формовочных смесей. Диссертация. Л., 1970.

4-8. **Иванов В. И.** Две схемы включения емкостного преобразователя для измерения неэлектрических величин.— «Известия вузов. Сер. Электромеханика», 1958, № 9.

4-9. **Wilska M. G.** Английский патент, класс G1N, № 1.082.872, 13.09.67.

4-10. **Кнеллер В. Ю.** Автоматическое измереиие составляющих комплексного сопротивления. М., «Энергия», 1967.

4-11. **Валитов Р. А.** Радиотехнические измерения. М., «Советское радио», 1963.

4-12. **Wood H. H.** Патент США, кл. 324-54, № 3.464.005, 02.08.69.

4-13. а) **Брякин В. И. и Скрипко А. Л.** Лабораторный измеритель влажности нефти. б) **Брякин В. И.** Автоматический влагомер нефти с емкостным датчиком.— В кн.: Методы и приборы определения состава и свойств вещества. Фрунзе, «Илим», 1968.

4-14. **Плакк П. М.** Новый метод измерения емкости конденсаторов с большими потерями.— «Труды Таллинского Политехнического института», 1958, серия А, № 137.

4-15. **Каменев Л. В., Левин А. М. и Митрофанов В. А.** Автоматический диэлектрометр со статическим уравновешиванием.— «Измерительная техника», 1971, № 8.

4-16. **Вайнштоk И. С. и Кубих А. Г.** Электронный измеритель влажности песка.— «Промышленность строительных материалов Москвы», 1962, № 4.

4-17. **Ройфе В. С.** Об одном из способов автоматической компенсации влияния диэлектрических потерь при измерении влажности материалов в переменном электрическом поле.— «Приборы и системы управления», 1967, № 5.

4-18. **Недзвецкий Ю. Э.** Авторское свидетельство № 107977. «Бюллетень изобретений», 1957, № 9.

4-19. **Голант В. Е.** Сверхвысокочастотные методы исследования плазмы. М., «Наука», 1968.

4-20. **Берлинер М. А.** Авторское свидетельство № 191890.— «Бюллетень изобретений», 1967, № 4.

4-21. **Берлинер М. А., Лелянов Б. Н. и Семенов Л. В.** Авторское свидетельство № 315.996.— «Бюллетень изобретений», 1971, № 29.

4-22. **Берлинер М. А. и Полищук С. А.** Характеристики фазовых флагомеров СВЧ.— «Приборы и системы управления», 1971, № 12.

4-23. **Stuchły S., Kraszewski A.** Pomiary wilgotności niektórych substancji stałych metodą mikrofalową. «Pomiary, automat., kontrola», 1966, № 8—9.

4-24. **Слоущ В. Г.** Авторское свидетельство № 232596.— «Бюллетень изобретений», 1969, № 1.

4-25. **Ловкис И. Н.** Исследование влажности древесины методом СВЧ. Диссертация. 1971.

4-26. **Kraszewski A.** Urządzenie mikrofalowe do przemysłowych pomiarów wilgotności różnych materiałów. «Pomiary, automat., kontrola», 1970, № 6.

4-27. **Бова Н. Т. и Лайхтман И. Б.** Измерение параметров волноводных элементов. Киев, «Техника», 1968.

4-28. **Lundstrom J. W., Mosteller M. D.** Патент США, кл. 324-58.Б, № 3.553.573, 05.01.71.

4-29. **Bosisio R. G.** and oth. Paper sheet moisture measurements by microwave phase perturbation techniques.— JI Microwave Power, 1970, № 1.

4-30. **Демьянов А. А.** Измерение в миллиметровом диапазоне длин волн содержания воды в нефти.— «Измерительная техника», 1971, № 8.

4-31. **Walker C. W. E.** Патенты США, кл. 324-58.5, № 3.255-408, 07.06.66 и № 3.509.452, 28.04.70.

4-32. **Берлинер М. А., Иванов В. А. и Клоков В. А.** Измерение влажности бетонной смеси и ее компонентов влагомерами СВЧ.— «Бетон и железобетон», 1969, № 2.

4-33. **Давыдов В. В. и Коптелов Ю. К.** Исследование электрофизических характеристик текстильных тканей для разработки емкостных влагомеров.— «Известия вузов. Сер. Технология текстильной промышленности», 1968, № 5.

4-34. **Saxton J. A.** Electrical properties of water. Wireless Engineer, 1949, № 312.

5-1. **Емельянов В. А.** Полевая радиометрия влажности и плотности почво-грунтов. М., Атомиздат, 1970.

5-2. **Горькова Н. А.** Исследование и выбор метода измерения влажности хлопчатобумажной ткани после отжима. Диссертация. М., 1971.

5-3. **Petersen D. H.** Патент США, кл. 250-43.5 № 3.452.193, 24.60.69.

5-4. Neutron moisture gauges. «Techn. Repts Ser. Int. Atom. Energy Agency». Vienna, 1970, № 112.

5-5. **Родэ Л. Г. и Нечаев О. М.** Исследование работы влагомера с детектором надтепловых нейтронов.— В кн.: Ядерные излучения и радиоактивные индикаторы в мелиорации. М., ВНИИГ, 1970.

5-6. **Corompt P.** Французский патент, класс G0,1п, № 1.483.840, 02.05.67.

5-7. **Шумиловский Н. Н., Скрипко А. Л., Король В. С., Ковалев Г. В.** Методы ядерного магнитного резонанса М., «Энергия», 1966.

5-8. **Добринская А. А.** Метод ЯМР в исследованиях связывания воды цементом и известью.— «Строительные материалы», 1969, № 2.

5-9. **Скрипко А. Л., Карташев С. А. и Мнльковский В. С.** Протонно-резонансный влагомер с автоматической настройкой резонансного режима. В кн.: Методы и приборы определения состава и свойств вещества. Фрунзе, «Илим, 1968.

5-10. **Rollwitz W. L.** Moisture measurements in various hygroscopic materials using nuclear magnetic resonance. «Humidity and moisture», vol. 2. New York, Reinhold, 1965.

5-11. **Скрипко А. Л.** Протонные магниторезонансные влагомеры.— «Приборы и системы управления», 1970, № 1.

5-12. **Черницын А. И.** Измерение влажности твердых тел импульсным методом ЯМР. В кн.: Радиоспектроскопия твердого тела. М., «Наука», 1967.

5-13. **Scrivens D. B., Kent D. W., Sargeant Royston A. E.** Infrared moisture measurement on the paper machine.— «Meas. and Contr.», 1970, № 2.

5-14. **Берлинер М. А.** Автоматический контроль малых концентраций влаги в жидких углеводородах.— «Химия и технология топлив и масел», 1968, № 2.

5-15. **Чудновский А. Ф.** Теплофизические характеристики дисперсных материалов. М., Физматгиз, 1962.

5-16. **Vos B. H.** Measuring moisture content and distribution in constructions.— «Build Internat.», 1970, № 3.

5-17. **Берлинер М. А. и Васильева И. И.** Определение влажности материалов по кривым охлаждения.— «Заводская лаборатория», 1969, № 1.

5-18. **Заливадный Б. С.** Динамический способ определения удельной теплоемкости среды.— «Измерительная техника», 1969, № 7.

5-19. **Валеев В. Г.** Исследование ультразвуковых систем контроля влажности керамических масс. Диссертация. Л., 1969.

5-20. **Дубицкий Л. Г.** Радиотехнические методы контроля изделий. М., Машгиз, 1963.

5-21. **Попов Р. Б.** Погрешность устройств автоматического анализа многокомпонентных производственных растворов.—В кн.: Автоматизация анализа химического состава вещества. Киев, УкрНИИНТИ, 1966, вып. 2.

5-22. **Дорогов Ю. И.** Бесконтактный радиоактивноемкостный метод измерения влагосодержания волокнистых материалов в слое переменной толщины. Диссертация. Минск, 1968.

5-23. **Пустынников В. Г.** Вопросы общей теории измерений в технике многочастотного контроля. Диссертация. Л., 1967.

5-24. **Джемелла В. В.** Многочастотный метод контроля влажности зерна. Диссертация. Одесса, 1966.

5-25. Патенты США, класс 324-61, № 3.155.899, 03.11.64; № 3.249.865, 03.05.66; № 3.323.045, 30.05.67; № 3.493.855, 03.02.70; № 3.496.460, 17.02.70; № 3.504.280, 31.03.70.

5-26. **Гартшорн Л. и Внльсон В.** Электрический влагомер.— «Британская промышленность и техника», май — июнь, 1947.

5-27. **Dalgarno G.** Английские патенты, класс G1N a) № 1.132.763, 06.11.68; б) № 1.136.826, 18.12.68.

6-1. **Харрисон Л. П.** Неидеальные газы.— В ки.: Влажность. Л., Гидрометеоиздат, 1969, т. 3.

6-2. **Матвеев Л. Т.** Основы общей метеорологии. Физика атмосферы. Л., Гидрометеоиздат, 1965.

6-3. **Эмдер Э.** Анализ употребляемых характеристик влажности, см. [Л. 6-1].

6-4. **Щукин А. И., Михайленко В. И. и Мотузова А. А.** Классификация и анализ методов измерения влажности газообразных сред. М., ОНТИПрибор, 1966.

7-1. **Уоррэл Р.** Психрометрическое определение относительной влажности воздуха при температуре, превышающей 100 °С.— В кн.: Влажность. Л., Гидрометеоиздат, 1967, т. 1.

7-2. **Döring R., Gubatz F., Gebauer M.** Psychrometrische Tabellen. tions-Psychrometers. «Arch. techn. Mess.», 1971, № 420.

7-3. **Bender E., Müller K.** Das dynamische Verhalten des Aspirations-Psychrometers. «Arch. techn. Mess.», 1971, № 420.

7-4. **Бокс Д. Е.** Конструирование термопарного психрометра на принципе эффекта Пельтье, см. [Л. 7-1].

7-5. **Каганов М. А.** Аппаратура для измерения влажности воздуха с применением полупроводниковых термосопротивлений.— В кн.: Контроль и регулирование влажности. Л., ЛОСНТО, 1963.

7-6. **Baker P. W.** Английский патент, класс G1N, № 1.152.876, 21.05.69.

7-7. **Берлинер М. А.** К вопросу об измерении психрометрической разности автоматическим компенсатором.— «Приборостроение», 1959, № 7.

7-8. **Bollen D.** A thermistor hygrometer. «Wireless World», 1969, № 1410.

7-9. **Lyle C. W.** Патент США, кл. 73-17, № 3.434.833, 25.03.69.

7-10. **Schröter R.** и др. Патент ГДР, кл. 42i, 19/05, № 50. 346, 20.09.66.

7-11. **Бэллинджер Д.** Автоматический гигрометр точки инея с радиоактивной индикацией, см. [Л. 7-1].

7-12. **Коленко Е. А.** Термоэлектрические охлаждающие приборы. Изд-во АН СССР, 1967.

7-13. **Bisberg A.** A miniature solid-state dew point sensor. «19-th Annual ISA Conf. Proc., New York, 1964, vol. 19, part 3». Pittsburgh, Pa, 1964, № 11, 2/1.

7-14. **Берлинер М. А.** Структурные схемы и математические модели гигрометров точки росы и с подогревными датчиками.— В кн.: Приборы и методы контроля и регулирования влажности. (Тезисы конференции). Л., ЛОСНТО, 1969.

7-15. **Ильярский О. И. и Удалов Н. П.** Термоэлектрические элементы. М., «Энергия», 1970.

7-16. **Фатеев Н. П., Стильбанс Л. С., Стернзат М. С.** Авторское свидетельство № 104130. — «Бюллетень изобретений», 1956, № 9.

7-17. **Меркулов А. П.** Вихревой эффект и его применение в технике. М., «Машиностроение», 1969.
7-18. **Ford S. H.** Патент США, класс 73-17, № 3.460.373, 12.08.69.
7-19. **Acheson D. T.** Vapor pressures of saturated aqueous salt solutions. «Humidity and Moisture», vol. 3. New-York, Reinhold, 1965.
7-20. **Lieneweg F.** Absolute und relative Feuchtebestimmungen mit dem Lithiumchlorid-Feuchtemesser. Siemens-Ztschr., 1955, № 5—6.
7-21. **Берлинер М. А., Якобишвили А. З.** Авторское свидетельство № 214155.— «Бюллетень изобретений», 1968, № 11.
7-22. **Берлинер М. А., Якобишвили А. З.** Новые подогревные датчики и гигротермические равновесные влагомеры.— «Приборы и системы управления», 1968, № 1.
7-23. **Усольцев В. А.** Приборы для измерения влажности воздуха на метеорологических станциях.— «Приборы и системы управления», 1970, № 1.
7-24. **Bernhard F.** Das dynamische Verhalten des Lithiumchlorid-Taupunkthygrometers. «Messen, Steuern, Regeln», 1968, № 7.
7-25. **Kostyrko K.** Dynamika chlorolitowych czujników punktów rosy. «Pomiary, automat., kontrola», 1969, № 8—9.
7-26. **Хедлин С. П., Трофименков Ф. Н.** Исследование точности и скорости реакции самоподогревающегося электрического гигрометра, см. [Л. 7-1].
7-27. **Scheibe W.** Fehlerverhalten von LiCl-Feuchtigkeitsmessgeräten. «PTB-Mitt.», 1970, № 3.
8-1. **Schaffer W.** A simple theory of the electric hygrometer. Bullet. Amer. Meteorological Soc., 1946, № 4.
8-2. **Hedlin C. P.** A resistance-humidity relationship for sensors of the Dunmore type. «Humidity and Moisture, vol. 1». New York, Reinhold, 1965.
8-3. **Матьюс Д. А.** Хлористолитиевые радиозондные гигрометры.— В кн.: Влажность. Л., Гидрометеоиздат, 1967, т. 1.
8-4. **Гершкович Е. А.** Электрические гигрометрические датчики.— «Приборы и системы управления», 1970, № 1.
8-5. **Джонс Ф.** Изучение изменений поверхностного электрического сопротивления пленок PbJ_2 в функции относительной влажности при комнатной температуре, см. [Л. 8-3].
8-6. **Муза Р., Шнейбл Г.** Полиэлектрические датчики влажности, см. [Л. 8-3].
8-7. **Коган В. А.** Разработка и исследование сорбционного датчика влажности воздуха на основе термообработанного полиакрилонитрила. Диссертация. Л., 1967.
8-8. **Barschdorff D., Bender E.** Experimentelle Bestimmung des Zeitverhaltens kommerzieller Feuchtegeber. «Messen, Steuern, Regeln», 1969, H. 8.
8-9. **Биргер Г. И. и Калашников В. И.** Автоматические измерители малых влагосодержаний воздуха и газов.— В кн.: Измерение влажности твердых материалов и газов. М., ЦИНТИэлектропром, 1960.
8-10. **Стайн С. Л.** Угольный датчик влажности, см. [Л. 8-3].
8-11. **Варженевский И. С., Белкина М. М.** Угольный датчик влажности.— «Труды НИИгидрометеоприборостроения». М., 1965, вып. 14, 60.
8-12. **Савченко В. Е.** Исследование и разработка кварцевых датчиков влажности и устройств кондиционирования воздуха для текстильных фабрик. Диссертация. М., 1966.

8-13. **Книнг У. Г.** Пьезоэлектрический сорбционный датчик, см. [Л. 8-3].

8-14. **Левчук Э. А.** Исследование частотного метода определения влагосодержания газов и разработка гигрометра с пьезокварцевым влагочувствительным элементом. Диссертация. Л., 1971.

8-15. **Джейсон А. С.** Некоторые свойства гигрометра с анодно-окисленной алюминиевой пленкой, см. [Л. 8-3].

8-16. **Мийата А.** Гигрометр с анодно-окисленной пленкой алюминия, см. [Л. 8-3].

8-17. **Stover C. M.** Aluminium oxide humidity element for radiosonde weather measuring use. Rev. Scientific Instruments, 1963, № 6.

8-18. **Найденов Р. О., Кореньков В. С., Федоров Б. И.** Измерение влажности парогазовой среды емкостным датчиком.— ИФЖ, 1969, № 5.

8-19. **Rockliff P.** Английский патент, класс G1N, № 1.236.591, 23.06.71.

8-20. **Olin C. B.** Патент США, класс 200-61.04, № 3.440.372, 22.04.69.

8-21. **Schaw J. L.** Английский патент, класс G1N, № 947.857, 29.01.64.

8-22. **Lai J. R., Hidy G. M.** Microsensor for measuring humidity. «Rev. Scient. Instrum.», 1968, № 8.

8-23. **Delaney R. A., Puttlitz K. J.** Патент США, класс 338-35, № 3.345.596, 03.10.67.

8-24. **Goldsmith P.** Английские патенты, класс G1N, № 1.032.563, 08.06.66 и № 1.105.941, 13.03.68.

8-25. **Bennett F., Conibear I. J.** Английский патент, класс G1N, № 1.245.025, 02.09.71.

8-26. **Чуха М.** Применение электролитического указателя влажности для измерений атмосферной влажности, см. [Л. 8-3].

8-27. **Пинхусович Р. Л.** Исследование и разработка кулонометрических влагомеров. Диссертация, М., 1970.

8-28. **Пинхусович Р. Л., Савкун Л. З., Патрушев Ю. Н., Коломыйцев В. П.** Приборы для измерения микро- и макроконцентраций влаги в газах и жидкостях.— «Приборы и системы управления», 1970, № 1.

9-1. **Magee J., Crain C.** Recording microwave hygrometer. Rev. Scientific Insturments, 1958, № 1.

9-2. **Smith Jr, E. K., Weintraub S.** The constants in the equation for atmospheric refractive index at radio frequencies. Proc. I. R. E., 1953, 41, 1035.

9-3. **Gates D. M.** The measurement of water vapor boundary layers in biological systems with a radio refractometer. «Humidity and Moisture», vol. 2. New York, Reinhold, 1965.

9-4. **Ветров В. В.** Исследование емкостных систем для измерения влажности воздуха. Диссертация. Л., 1970.

9-5. **Birnbaum G. A.** A recording microwave refractometer. Rev. Scientific Instruments, 1950, № 2.

9-6. **Берлинер М. А. и Лопухов К. К.:** а) Авторское свидетельство № 266283. — «Бюллетень изобретений», 1970, № 11; б) Безынерционные электрические гигрометры с датчиками коронного разряда.—«Заводская лаборатория», 1971, № 2.

9-7. **Лопухов К. К.** Датчики короного разряда для контроля влажности при изготовлении кирпича.— «Строительные материалы», 1970, № 2.

9-8. **Зуев В. Е.** Распространение видимых и инфракрасных волн в атмосфере. М., «Советское радио», 1970.

9-9. **Вуд Р.** Инфракрасный гигрометр и его применение к сложным задачам измерения влажности.— В кн.: Влажность. Л., Гидрометеоиздат, 1967, т. 1.

9-10. **Рэндел Д. Р. и** др. Лайман-α-влагомер Военно-морской исслед. лаб., см. [Л. 9-9].

9-11. **Larison O. K.** Патент США, класс 250-83.3, № 3.403.253, 24.09.68.

9-12. **Берлинер М. А. и Бржозовский Б. М.** Лазерный гигрометр. Научно-техн. сб. Сер. «Автоматизация и контрольно-измерительные приборы», М., ЦНИИТЭнефтехим, 1972, № 10.

9-13. **Thompson M. C.** A radio-optical dispersometer for studies of atmospheric water vapor. «Remote Sensing of Enviroment», 1971, № 1.

9-14. **Резников М. И.** и **Миропольский З. Д.** Радиоизотопные методы исследования внутрикотловых процессов. М., «Энергия», 1964.

9-15. **Csom G., Benedek S.** Neue Verfahren zur Feutchtigkeitsmessung von Nassdampf mit radioaktiven Isotopen. «Wärme», 1971, № 5.

9-16. **Черри Р. Г.** Применение анализа газа по теплопроводности в гигрометрии, см. [Л. 9-9].

9-17. **Флюмерфельт Д.** Чувствительный регистратор водяного пара, основанный на принципе определения теплоты адсорбции, см. [Л. 9-9].

9-18. **Flumerfelt G.** Английский патент, класс G01n, № 1.039.220, 17.08.66.

9-19. **Полонская С. Л.** Автоматический влагомер для высокотемпературного газа.— В кн.: Автоматизация, телемеханизация и связь в газовой промышленности. М., ВНИИЭгазпром, 1968, № 5.

9-20. **Дерягин Б. В. и Мельникова М. К.** Мембранный гигрометр и применение его для определения относительной влажности воздуха.— «Метеорология и гидрология», 1952, № 5.

9-21. **Greinacher H.** Das Diffusionhygrometer. Schweiz. Arch. angew. Wiss. Techn., 1949, vol. 15, 353.

10-1. **Гоженко Н. А.** Экспресс-метод определения влажности нитроцеллюлозы, см. [Л. 1-11].

10-2. **Bloom M. S.** Английский патент, класс G1S, № 1.021.745, 09.03.66.

10-3. **Чарлсон Р. Д.** Взаимодействие водяного пара с тонким слоем жидкости.— В кн.: Влажность. Л., Гидрометеоиздат, 1967, т. 1.

10-4. **Yu I., Hedlin C. P., Green G. N.** Humidity measurement using gas-liquid chromatography. «J. Chromatogr. Sci.», 1970, № 8.

10-5. а) **Арутюнов Ю. И., Лазовский Л. И.** и **Дзюба Е. И.** Измерение влажности нефти и нефтепродуктов методом газовой хроматографии; б) **Милешкевич В. П., Николаев Г. А., Карлин А. В. и Панова Р. В.** Количественное определение содержания воды методом ГЖХ.— В кн.: Приборы и методы контроля и регулирования влажности. (Тезисы конференции). Л., ЛОСНТО, 1969.

10-6. **Вайс Э. Л., Бурке Р. В., Тейлор Д. К.** Определение влажности зерна методом газовой хроматографии.— В кн.: Влажность. Л., Гидрометеоиздат, 1968, т. 4.

10-7. **Collier G. L., Green R. E.** The on-line measurement of water in polymers. «Measurement and Control», 1968, № 1.

10-8. **Gifford A. F.,** and oth. Mass spectrometer analysis of alcohols and other oxygenated derivatives. Anal. Chem., 1949, 9, № 21.

10-9. **Согин А. Е., Татиевский В. Л., Венедиктов М. В., Рудный Н. М.** Калориметрический метод измерения малых влагосодержаний порошкообразных водорастворимых материалов.— ИФЖ, 1971, № 1.

10-10. **Берлинер М. А., Розенталь Ф. А.** и **Трусов Д. П.** Авторское свидетельство № 168943. — «Бюллетень изобретений», 1965, № 5.

10-11. **Gröninger K.** Швейцарский патент, класс G01n, № 469.259, 15.04.69.

10-12. **Ohlheiser C. E.** Патент США, класс 73-53, № 3.077.105, 12.02 63.

10-13. **Бойукос Д. Д.** Блок из чистого гипса для непрерывных измерений влажности почвы в полевых условиях, см. [Л. 10-6].

10-14. **Остапчик В. П.** Прибор для измерения влажности почв. Центр. институт технико-экономич. информации ГНТК РСФСР.— Бюллетень технико-экономич. информации, 1959, № 10.

10-15. **Lerner J.** Патент США, класс 73-53, № 3.263.492, 02.08.66.

11-1. British Standard BS 1339. Definitions, formulae and constants relating to the humidity of the air.

11-2. а) ГОСТ 14.203-69. Диэлькометрический метод определения влажности нефти и нефтепродуктов. б) ГОСТ 17.142-71. Влагомеры газов кулонометрические. Общие технические условия.

11-3. **Берлинер М. А.** Оценка погрешностей влагомеров.— «Измерительная техника», 1969, № 4.

11-4. **Кричевский Е. С.** Методика составления градуировочных характеристик влагомеров.— «Измерительная техника», 1969, № 12.

11-5. **Kostyrko K., Jaworski J.** Opracowanie matematyczne wyników wzorcowania. «Pomiary, automat., kontrola», 1972, 18, № 9.

11-6. **Гершкович Е. А.** Разработка и исследование оборудования типовой поверочной лаборатории гигрометрии.— «Измерительная техника», 1970, №10.

11-7. **Kostyrko K., Okołowicz-Grabowska B.** Pomiary i regulacja wilgotności w pomieszczeniach. Warszawa, Arkady, 1971.

11-8. **Wexler A., Hyland R.** The NBS standard hygrometer. «Humidity and Moisture», vol. 3. New York, Reinhold, 1965.

11-9. **Akhtar M., Ingram G.** Английский патент, класс G1B, G1W, № 1.030.696, 25.05.66.

11-10. **Wexler A., Hasegawa S.** Relative humidity-temperature relationships of some saturated salt solutions in the temperature range 0 to 50 °C. J. Res. NBS, 1954, 53, RP 2512.

11-11. **O'Brien F. E. M.** The control of humidity by staturated salt solutions. Rev. Scientific Instruments, 1958, № 3.

11-12. **Симонян Г. А., Шахбудагян-Шоу С. Э., Мандрохлебов В. Ф., Гриднев А. С.** Стационарные и переносные гигростаты с использованием насыщенных растворов солей. — «Приборы и системы управления», 1970, № 2.

11-13. **Wexler A., Brombacher W. G.** Fundamental techniques for calibrating hygrometers. «Instrumentation», 1952, 5, 25.

11-14. **Kertzman J.** New humidity generator. «ISA Trans.», 1968 (1969), № 4.

11-15. **Schoen O. W.** Патент США, класс 236-44, № 3.532.270, 06.10.70.

11-16. **Уайлдхек У. А.** и др. Адсорбционный гигрометр непрерывного действия с пневматическим мостом, использующим критический поток.— В кн.: Влажность. Л., Гидрометеоиздат, 1967, т. 1.

11-17. **Wylie R. G.** The properties of water-salt systems in relation to humidity, см. [Л. 11-8].

11-18. **Hasegawa S., Garfinkel S. B., Wexler A.** Simple humidity lag apparatus. Rev. Scientific Instruments, 1955, № 12.

11-19. **Бернгард Ф.** Установки для определения статических и динамических характеристик гигрометров и гигрометрических датчиков.— «Приборы и системы управления», 1970, № 2.

11-20. **Мелкумян В. Е.** Поверка влагомеров для неводных жидкостей.— «Измерительная техника», 1968, № 5.

11-21. **Мелкумян В. Е., Клугман И. Ю., Ковылов Н. Б.** Поверка диэлькометрических влагомеров для нефти.— «Измерительная техника», 1969, № 8.

11-22. **Лошак В. И.** Разработка образцового метода измерения влажности зерна.— В кн.: Измерение влажности твердых материалов и газов. ЦИНТИэлектропром, 1960.

11-23. **Mess E., Ach K. H.** Etalon pour la vérification des instruments de mesure du degré d'humidité des grains. Bull. Organis. internat. métrol. legale, 1961, № 6.

11-24. **Гордина Ф. В.** Исследование и разработка исходного (эталонного) метода определения влажности зерна и зерновых продуктов. Диссертация. М., 1970.

11-25. **Wyżykowska A.** Wzorcowe metody pomiaru wilgotności ciał stałych. «Pomiary, automat., kontrola», 1966, 12, № 8—9.

11-26. **Коллинз Б. Д.** Интегратор записи градиента температуры и влажности. — В кн.: Влажность. Л., Гидрометеоиздат, 1967, Т. 1.

11-27. **Берлинер М. А.** Измеритель перепада влажности воздуха. — «Приборы и средства автоматизации», 1962, № 4.

11-28. **Берлинер М. А.** Программный регулятор влажности и температуры сыпучих материалов. — «Приборы и средства автоматизации», 1962, № 12.

11-29. **Ball K. T.** Патент США, класс 72-233, № 3.277.710, 11.10.66.

11-30. **Пеннер Э.** Использование критерия сосущей силы в качестве меры влажности почвы и других пористых материалов. — В кн.: Влажность. Л., Гидрометеоиздат, 1968, Т. 4.

11-31. **Hoffman G. J., Herkelrath W. N.** Design features of intact leaf thermocouple psychrometers for measuring water potential.— «Trans. Americ. Soc. Agricultur. Engineers», 1968, № 5.

11-32. **Камбефорт Х. и Карон К.** Электрические измерения пористости или влажности почв, см. [Л. 11-30].

11-33. **Берлинер М. А.** Авторское свидетельство № 152425. — «Бюллетень изобретений», 1962, № 24.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие . 3
Введение . 5

ЧАСТЬ ПЕРВАЯ

ИЗМЕРЕНИЯ ВЛАЖНОСТИ ТВЕРДЫХ МАТЕРИАЛОВ И ЖИДКОСТЕЙ

Глава первая. **Влажность материалов и методы ее определения** 16

1-1. Влага в твердых материалах и жидкостях . . 16
1-2. Величины, характеризующие содержание влаги в твердых материалах и жидкостях 23
1-3. Обзор и классификация методов измерения влажности 26

Глава вторая. **Теоретические основы электрических методов измерения влажности** 32

2-1. Общие положения. Основы кондуктометрического метода 32
2-2. Теоретические основы диэлькометрического метода 37
2-3. Диэлектрические характеристики влагосодержащих материалов 46

Глава третья. **Датчики электрических влагомеров** . . 52

3-1. Теоретические основы 52
3-2. Подавление возмущающих воздействий в датчиках влагомеров 65
3-3. Конструктивные исполнения датчиков . 71

Глава четвертая. **Измерительные устройства и характеристики электрических влагомеров** 88

4-1. Кондуктометрические влагомеры 88
4-2. Измерительные устройства диэлькометрических влагомеров с рабочей частотой ниже 100 *Мгц* . 102
4-3. Влагомеры сверхвысоких частот 129
4-4. Характеристики диэлькометрических влагомеров . 146

Глава пятая. **Методы, основанные на измерении неэлектрических свойств материалов** . 155

5-1. Радиометрические методы 155
5-2. Метод ядерного магнитного резонанса . . . 172
5-3. Оптические, теплофизические и прочие методы 182
5-4. Многопараметрические методы 191

ЧАСТЬ ВТОРАЯ
ИЗМЕРЕНИЯ ВЛАЖНОСТИ ГАЗОВ

Глава шестая. **Влажность газов. Методы и единицы измерения** 199

6-1. Общие сведения. Единицы измерения влажности газов 199
6-2. Обзор и классификация методов измерения влажности газов . . 206

Глава седьмая. **Гигрометры, основанные на температурных методах** 212

7-1. Электрические психрометры 212
7-2. Гигрометры точки росы 230
7-3. Гигрометры с подогревными датчиками 247

Глава восьмая. **Гигрометры с электрическими датчиками влажности** 261

8-1. Общие сведения. Электролитические датчики 261
8-2. Электрические сорбционные датчики . . 276
8-3. Гигрометры с кулонометрическими датчиками 291

Глава девятая. **Гигрометры, осиованные на измерении физнческих свойств газов** 303

9-1. Гигрометры, основанные на измерении электрических параметров газов 303
9-2. Спектроскопические и радиометрические методы . 312
9-3. Гигрометры, основанные на других физических свойствах газов . 322

ЧАСТЬ ТРЕТЬЯ
ОБЩИЕ ВОПРОСЫ ИЗМЕРЕНИЙ ВЛАЖНОСТИ

Глава десятая. **Методы и технические средства, общие для различных агрегатных состояний тела** . 331

10-1. Общие положения. Массоперепосные методы 331
10-2. Гигро- и гидротермический равновесные методы 336

Глава одиннадцатая. **Метрологическое обеспечение измерений влажности** . 353

11-1. Общие положения 353
11-2. Методы и технические средства градуировки и поверки гигрометров 356
11-3 Методы и технические средства градуировки и поверки влагомеров 373
11-4. Технические средства получения информации о величинах, связанных с влажностью . . 380

Список литературы 387

СПИСОК ОПЕЧАТОК

Стр.	Строка	Напечатано	Следует читать
3	9 сверху	средств	сред
6	17 сверху	исследовании	использовании
61	11 сверху ф-ла (3-9)	B_d	B_Φ
356	5 и 6 сверху	проверочной	поверочной
381	4 сверху	(11-7)	(11-6)
383	19 сверху	[Л. 1]	[Л. 0-1]
393	23 сверху	tions-Psychrometeis. „Arch. techn. Meis.“, 1971, № 420.	Leipzig, Verlag für Grundstoffindustrie, 1968.