

ИЗМЕРЕНИЕ ВЛАЖНОСТИ

В любом технологическом процессе важное значение отводится контролю качества сырья, а также готовой продукции. На практике пригодность разных материалов (зерно, цемент, уголь и др.) серьезно зависит от уровня влажности. Влажность технологических газов (воздух, азот, аргон, кислород, водород и т.д.), используемых в различных отраслях промышленности решающим образом влияет на качество (а часто и количество) выпускаемой продукции. Жизнедеятельность животных и растительных организмов возможна только в определённых диапазонах относительной влажности воздуха.

Поэтому задача измерения влажности газов, жидкостей и твердых веществ является весьма распространенной и актуальной. Измерители влажности, или влагомеры, используются как на производстве, так и в лабораторных условиях.

Под влажностью понимают выраженное в процентах отношение массы влаги находящейся в данном объеме материала, к его абсолютно сухой массе

Влажность можно характеризовать также *влагосодержанием*, или *абсолютной влажностью* — количеством воды, отнесённым к единице массы сухой части материала. Такое определение влажности широко используется для оценки качества древесины. Эту величину не всегда можно точно измерить, так как в ряде случаев невозможно удалить всю неконденсированную воду и взвесить предмет до и после этой операции.

Относительная влажность — это отношение массы влаги, содержащейся в материале, к его массе во влажном состоянии.

3.1. Измерение влажности воздуха неэлектрическими методами

Влажность воздуха — величина, характеризующая содержание водяных паров в атмосфере Земли — одна из наиболее существенных характеристик погоды и климата, комфортности нахождения в жилых и общественных помещениях, обеспечения норм различных технологических процессов производства. Влажность воздуха в земной атмосфере может изменяться в широких пределах. Так, у земной поверхности содержание водяного пара в воздухе составляет в среднем от 0,2 % по объёму в высоких широтах до 2,5 % в тропиках.

Абсолютная влажность воздуха — количество водяного пара, фактически содержащегося в 1 м³ воздуха. Определяется как отношение массы содержащегося в воздухе водяного пара к объёму влажного воздуха. Единица абсолютной влажности — грамм на метр кубический (г/м³).

Относительная влажность воздуха – отношение его текущей абсолютной влажности к максимальной абсолютной влажности при данной температуре (табл. 3.1)

Таблица 3.1

Зависимость максимальной влажности воздуха от температуры

Температура,	-30	-20	-10											
Максимальная абсолютная влажность														

Относительная влажность выражается в процентах.

Влажность воздуха возможно измерять неэлектрическими методами – гигрометрами и психрометрами.

Гигрометр – измерительный прибор для определения влажности воздуха. Существует несколько типов гигрометров, действие которых основано на различных принципах: весовой, волосной, плёночный и прочих.

Действие волосного гигрометра (Рис. 3.1, а) основано на свойстве обезжиренного волоса изменять свою длину при изменении влажности воздуха, что позволяет измерять относительную влажность от 30 до 100 %. Волос 1 (рис. 3.1) натянута на металлическую рамку 2. Изменение длины волоса передаётся стрелке 3, перемещающейся вдоль шкалы 4.

Плёночный гигрометр (Рис. 1, б) имеет чувствительный элемент из органической плёнки, которая растягивается при повышении влажности и сжимается при понижении. Изменение положения центра плёночной мембраны 1 передаётся стрелке 2, положение которой регистрируется с помощью шкалы 3. Волосной и плёночный гигрометр в зимнее время являются основными приборами для измерения влажности воздуха.

В гигроскопических электрохимических влагомерах влажность газов оценивается по изменению свойств электролита, налитого в баллон влагомера.

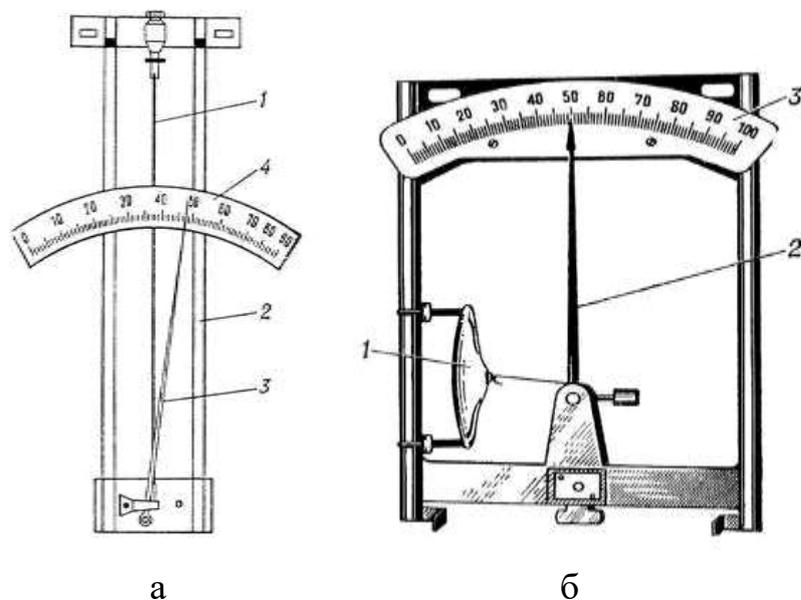


Рис. 3.1. Гигрометры: а – волосяной; б - пленочный

Психрометр – это устройство, с помощью которого производится измерение абсолютной и относительной влажности воздуха. В основу работы этого прибора заложен принцип определения интенсивности испарения воды по степени понижения температуры, испаряющей поверхности. Наиболее простым является психрометр Августа (Рис. 3.2).

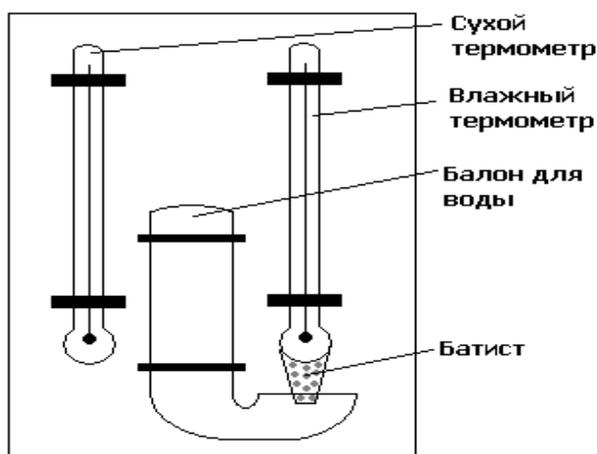


Рис. 3.2. Психрометр Августа

Психрометр Августа состоит из двух одинаковых стеклянно-ртутных или стеклянно-спиртовых термометров укрепленных на одном штативе и небольшого резервуара для воды. Шкала термометра градуирована от - 25 до + 50 градусов с интервалом делений 0,2 °С. Ртутный резервуар одного из них помещен в колпачок из тонкой влажной ткани (батиста или простой марли), конец которой в виде жгутика помещен в сосуд с дистиллированной водой.

Этот термометр называется влажным или смоченным. При этом сам резервуар не погружен в воду (иначе термометр будет показывать температуру воды) и расстояние от уровня воды до резервуара составляло не менее 3-4 сантиметров. Такое расстояние обеспечит циркулирование вокруг резервуара именно исследуемого воздуха, а не водяных паров образующихся при испарении дистиллированной воды. Второй термометр, ртутный резервуар которого остается свободным, обозначается как сухой термометр.

3.2. Измерение влажности твердых материалов

По методам измерений влагомеры твердых материалов разделяются на две основных группы: использующие прямой и косвенный метод измерений.

При прямом методе производится непосредственное разделение материала на влагу и сухое вещество. В измерителях влажности, работающих по косвенному методу, измеряется величина, связанная с влажностью материала.

3.2.1. Влагомеры с косвенным методом определения влажности

Прямой метод (сушильно-весовой) измерения влажности работает следующим образом: при высушивании непрерывно определяется масса пробы. Если при двух последних взвешиваниях результаты не изменились, сушка заканчивается. При этом предполагается, что почти вся влага, содержащаяся в образце, удалена. После этого влагомер сравнивает массу пробы до и после высушивания и определяет массовую долю влаги пробы путем несложных арифметических вычислений. При использовании прямого метода вычислений длительность периода измерения занимает от получаса до нескольких часов.

Определению влажности твердых материалов высушиванием присущи следующие методические погрешности:

а) при высушивании органических материалов наряду с потерями 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 коллоидальной 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 ускоренных методах сушки возможно более быстрое измерение, но они могут повлиять на точность.

На рис. 3.3 показан *инфракрасный влагомер* предназначенный для определения влажности методом сушки путем нагревания пробы и ее взвешивания до и после сушки. Количество влаги определяется путем вычета массы пробы до и после сушки. Данный влагомер является высокоточным прибором с определением влажности от 0,1 до 0,01 %. Источником нагрева служит инфракрасная кварцевая лампа 625 Вт. Влагомер имеет разные режимы измерений: автоматический, временной, высокоскоростной, низкоскоростной, ускоренный, предписанный. Имеется программное обеспечение для вывода данных на компьютер.



Рис. 3.3. Инфракрасный влагомер FD-720 (фирма Kett, Япония), работающий по методу сушки

Влагомер использующий метод отражения в инфракрасной области (Рис. 3.4) позволяет выполнять измерения без повреждения пробы. Для того чтобы измерить отраженное излучение, необходимо пробу облучить.

Проба помещается на поворотный стол, который во время измерения вращается и прибор автоматически выполняет измерение. В автоматическом режиме среднее значение параметра появляется на экране не позднее чем через 10 с. На экране персонального компьютера могут одновременно отображаться результаты определения содержания нескольких компонентов. Например, при анализе молока: содержание влажности, протеина, сахара и жира. Если ПК не

подключен к анализатору, результаты анализа каждого компонента можно просмотреть на дисплее прибора.



Рис. 3.4. Инфракрасный влагомер, работающий по методу отражения

Влагомеры, в которых реализован прямой метод измерения влажности, являются самыми точными. Но они имеют недостатки, заключающиеся в основном в высокой стоимости и длительном периоде измерения. Самый главный недостаток – такой метод измерения является разрушающим.

3.2.2. Влагомеры с косвенным методом определения влажности

Там, где не требуется высокая точность, большее распространение получили влагомеры с косвенным методом определения влажности.

Влагомеры, работающие по косвенным методам, измеряют не саму влажность, а физический параметр с ней связанный, и переводят измеренную величину в значение влажности. Косвенные методы требуют предварительной градуировки с целью установления зависимости между влажностью материала и измеряемой величиной.

Наибольшее распространение нашли емкостные и кондуктометрические. И те, и другие работают на основе анализа поведения влажных материалов в электрических полях.

К кондуктометрическому типу относятся так называемые ***игольчатые влагомеры***. В них измерение влажности производится путем измерения электрического сопротивления между двумя контактами (иглами) прибора, погруженными в исследуемый материал. 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 низких значениях влажности проводить измерения прибором игольчатого типа затруднительно, так как электрическое сопротивление в этом случае очень велико. Поэтому они имеют ограничение по диапазону измерения, Например, влажность 4-6 %, которая характерна для древесины в конце процесса сушки.

Так как максимальная глубина, на которой возможно измерение влажности, определяется длиной игл-электродов, то всегда известно на какой глубине в объекте контроля производятся измерения. Но иглы большой длины трудно «загнать» в контролируемый объект из-за возможности их повредить, поэтому в основном выпускаются приборы с иглами длиной до 3 см. Приборы, основанные на кондуктометрическом принципе измерения, хороши для контроля за влажностью на глубинах до 2-3 см и имеют широкий диапазон измерения влажности, но не подходят для контроля влажности до 4 %.

Например игольчатый влагомер (Рис. 3.5) Testo 606-1 предназначен для измерения влажности древесины, бетона и других строительных материалов. Позволяет проводить измерения влажности на поверхности и небольшой глубине (до 2 см), идеален для контроля тонких строительных материалов с погрешностью ± 1 %. Имеет встроенные градуировочные зависимости по 7 группам строительных материалов. Прибор построен на кондуктометрическом принципе. Для удобства их использования в приборы внесены градуировочные зависимости для разных видов строительных



Рис. 3.5. Игольчатый влагомер

Резистивные датчики влажности фиксируют изменения электрического сопротивления гигроскопической среды (например, проводящего полимера, соли или обработанной подложки). Резистивные датчики имеют бифилярную намотку. После покрытия гигроскопическим полимером, их сопротивление оказывается обратно пропорциональным влажности.

Обычно, резистивные датчики состоят из металлических электродов, наложенных на подложку с помощью фоторезистора или намотанных на

пластиковых или стеклянный цилиндр электродов. Подложка покрывается солевым или проводящим полимером. Когда он растворяется или помещается в жидкое вещество, он ровно покрывает датчик. В другом случае, подложка может быть обработана каким-либо химическим реагентом, например, кислотой. Датчик поглощает водяной пар и ионные группы распадаются, что увеличивает электрическую проводимость. Время отклика для большинства резистивных датчиков составляет от 10 до 30 секунд. Диапазон сопротивлений типичного резистивного элемента колеблется от 1 кОм до 100 МОм.

Большинство резистивных датчиков используются на переменном напряжении возбуждения без смещения постоянным током для предотвращения поляризации датчика. Образовывающийся ток конвертируется и выпрямляется в сигнал постоянного напряжения для дальнейшего усиления, линеаризации или аналого-цифрового преобразования.

Главное преимущество резистивных датчиков влажности заключается в их взаимозаменяемости, что позволяет использовать резистор для калибровки схемы усиления сигнала на фиксированном уровне влажности. Это позволяет устранить необходимость в стандартах калибровки влажности. Точность каждого резистивного датчика влажности можно измерить в калибровочной емкости или с помощью специальной компьютерной системы. Диапазон рабочих температур резистивных датчиков влажности составляет от -40 до 100

В конструкции современных резистивных датчиков используется керамическое покрытие для снижения слияния условий окружающей среды при возникновении конденсата. Датчики состоят из керамической подложки с металлическими электродами, нанесенными по фоторезистивной технологии. Поверхность подложки покрыта проводящим полимером (или смешанным керамическим составом), а сам датчик помещается в защитный пластиковый корпус с пылевым фильтром.

В условиях бытовой и коммерческой эксплуатации срок службы таких датчиков составляет более 5 лет, однако воздействие химических паров и других загрязнений (масла, например) может привести к их досрочному выходу из строя. Другой недостаток резистивных датчиков влажности – их тенденция к сдвигу значений при работе в конденсате, если используется растворимое в воде покрытие. Резистивные датчики имеют значительную зависимость от температуры, когда применяются в среде с большими температурными изменениями. В тоже время, схема термокомпенсации может быть добавлена в конструкцию датчика для увеличения его точности.

Таким образом, основными преимуществами резистивных датчиков являются небольшие размеры, малая стоимость, взаимозаменяемость и долгосрочная стабильность.

Емкостной измеритель влажности.

Диэлектрическая проницаемость вещества, насыщенного водяными парами, и его емкость пропорциональны относительной влажности. Поэтому в качестве датчиков относительной влажности может быть использован конденсатор, между пластинами которого расположен соответствующий диэлектрический материал, проницаемость которого зависит от влажности окружающей среды.

На рис. 3.6 показан ***емкостной измеритель влажности***, предназначенный для определения влажности сыпучих веществ, например, сельхозпродуктов. Влагомер использует диэлькометрический метод измерения. В память прибора заложены большое количество градуировок зерновых культур (до 99). Предусмотрена связь с компьютером.



Рис. 3.6. Емкостной влагомер PM-600 (Aquasearch)

Измерители влажности, использующие емкостной метод, отличаются высокой скоростью измерения и неразрушающим воздействием на исследуемый образец. В отличие от других измерительных систем, емкостные датчики влажности отличаются полным диапазоном измерений (0...100 %), высокой точностью и температурной стабильностью. Тем не менее, точность измерений первичных преобразователей зависит от температуры окружающей среды. Для обеспечения надежности работы датчика в широком диапазоне рабочих температур необходимо использовать дополнительные схемы термокомпенсации.

На практике измерение емкости производится за счет подачи сигнала возбуждения на электроды датчика. Изменение емкости датчика преобразуется в изменение напряжения, тока, частоты или ширины импульсов. Существует несколько типичных методов измерения емкости.

Первый, или «прямой», метод подразумевает заряд конденсатора от источника тока в течение определенного времени и затем измерение напряжения на конденсаторе. Этот метод требует наличия прецизионного источника очень маленького тока и высокоимпедансного входа измерения напряжения.

Второй метод подразумевает использование измеряемой емкости в качестве времязадающей цепочки RC-генераторе с последующим измерением постоянной времени, частоты или периода. Этот метод прост, но обычно не обеспечивает высокой точности.

Третий метод заключается в измерении импеданса конденсатора на переменном токе. Источник синусоидального сигнала подключается к конденсатору, и при этом измеряются напряжение и ток через конденсатор. Однако такая схема очень сложна и состоит из многих компонентов.

Четвертый, наиболее распространенный, метод измерения емкости прецизионного датчика с малой величиной емкости заключается в применении зарядового усилителя, который преобразует соотношение измеряемой и опорной емкостей в сигнал напряжения. Такая схема поставляется в виде специализированных микросхем и подходит для некоторых систем при больших объемах производства.

Наряду с ёмкостными и кондуктометрическими влагомерами, влажность твёрдых тел определяется с использованием *метода ядерного магнитного резонанса (ЯМР) – резонансного поглощения радиоволн СВЧ диапазона ядрами водорода, входящими в состав воды*. В таком влагомере контролируемый материал помещают в катушку колебательного контура радиочастотного генератора, частоту которого плавно изменяют. При частоте, соответствующей ядерному магнитному резонансу, резко возрастает поглощение энергии в колебательной контуре. Величина поглощённой энергии служит мерой влажности материала.

Радиометрические методы базируются на современных способах исследования состава, структуры и свойств вещества, использующих взаимодействие различных видов электромагнитных колебаний и ядерных излучений с исследуемым веществом. В радиометрических (ядерно-физических) методах используются различные виды ядерных излучений (гамма-лучи, бета-частицы, быстрые нейтроны) и взаимодействий (поглощение и рассеяние гамма- и бета-излучения, упругое рассеяние быстрых нейтронов).

В *дизелькометрическом методе* чаще всего используется средневолновой и коротковолновой диапазоны частот или сверхвысокие частоты. Поведение диэлектрика в синусоидальном электромагнитном поле

характеризуется величинами комплексной диэлектрической и магнитной проницаемостей. При измерении влажности используются следующие пары величин:

- а) вещественная и мнимая составляющие комплексной диэлектрической проницаемости;
- б) диэлектрическая проницаемость и тангенс угла диэлектрических потерь;
- в) диэлектрическая проницаемость и удельная проводимость (ее активная составляющая).

Методы СВЧ-влажнометрии разделяют на:

- методы, основанные на измерении характеристик поля стоячих волн;
- методы, основанные на измерении характеристик поля волн, прошедших через влажный материал (оптические методы).

К первой группе методов относятся:

а) метод, основанный на измерении поля стоячей волны в образце исследуемого диэлектрика. Основывается на вычислении диэлектрической проницаемости влажного материала, которая является функцией влагосодержания, по результатам измерения величины фазовой части постоянной распространения. Практически измерения сводятся к определению длин волн в системе без диэлектрика и с диэлектриком;

б) метод, основанный на изучении поля стоячих волн, возникающих при отражении электромагнитной энергии от образца исследуемого материала. Сущность метода состоит в определении постоянной распространения в образце измеряемого материала путем изучения картины распределения стоячей волны на участке линии, не заполненной диэлектриком;

в) метод, основанный на использовании волн, отраженных от поверхности измеряемого образца. В этом случае для определения диэлектрической проницаемости используют параметры волны, возникшей в результате взаимодействия падающей и отраженной волн;

г) резонансный метод основан на измерении параметров резонатора при внесении в него исследуемого материала. Измеряя частоты резонатора, определяют диэлектрическую проницаемость, а измеряя ее добротность, определяют коэффициент потерь.

Вторая группа методов основана на исследовании характеристик электромагнитной волны, прошедшей через образец испытуемого материала, путем сравнения с характеристиками волны, распространяющейся по другому пути, или волны, распространяющейся по тому же пути, но при отсутствии материала. Измерения сводятся к определению комплексного коэффициента передачи участка направляющей системы, заполненной исследуемым веществом (коэффициентов поглощения и отражения, как функции

влажносодержания). Такой системой может являться как волновод, частично или полностью заполненный материалом, так и область свободного пространства, в которой распространяются электромагнитные колебания СВЧ.

На рис. 3.7 показан *бесконтактный измеритель влаги*, основанный на измерении затухания электромагнитных волн в зависимости от степени влажности материала. Приборы этой группы имеют неконтролируемую глубину измерения (4-6 см), результатом чего является некая средняя влажность, но при этом отпадает проблема размещения щупов внутри исследуемых предметов и не портится внешний вид поверхности. Они имеют высокую чувствительность при невысоких значениях влажности (от 1-2 %), возможность обнаружения переувлажненных участков под покрытиями, например под кафельной плиткой, могут контролировать влажность сыпучих материалов. Данный метод измерения не чувствителен к температуре, что позволяет работать без таблиц температурной коррекции.



Рис. 3.7. Бесконтактный влагомер GANN COMPACT A

К сожалению, подобными приборами нельзя точно померить влажность свыше 50-60 %, так как свыше этого диапазона погрешность их измерений не нормируется.

Большое распространение имеют *оптические методы*, основанные на зависимости оптических свойств материалов от их влагосодержания. Их характерной особенностью является бесконтактность измерений, возможность интегральной оценки влажности в больших объемах (большая информационная емкость метода). Последнее является важным достоинством, так как в реальных производственных условиях всегда наблюдается неравномерное распределение влаги в объеме. Для твердых материалов используется инфракрасная и видимая области спектра.

Теплофизические методы основаны на зависимости от влажности материала его теплофизических свойств - коэффициента теплопроводности, удельной теплоемкости и т.д.

3.3. Определение влажности газов

Влагомер (Рис. 3.8), основанный на тепловом эффекте реакции сорбции состоит из двух трубок, по которым протекают две параллельные струи потока жидкого сорбента влаги. По правой трубке противоток барботирует анализируемый на влагу газ. Разность температур двух потоков, обусловленная поглощением влаги из газа, выходящего после этого наружу, измеряется дифференциальной термобатареей. Пределы измерения прибора такого типа (модель «Термо-флюкс», Германия) от 0 до 0,3 % объемных единиц (минимум) и до 3,3 % объемных единиц (максимум). Прибор не требует электрического питания и взрывобезопасен.

3.4. Определение влажности жидкости

На рис. 3.9 представлена схема влагомера жидкости, действие которого основано на изменении электрической ёмкости частотного преобразователя, которая является функцией влажности исследуемой жидкости. Сигнал прибора передается по кабелю в устройство расшифровки, которая производится с использованием градировочного графика. Влагомеры такого типа используются, в частности, для определения содержания воды в нефти.



Рис. 3.8. Принцип действия влагомера, основанного на тепловом эффекте реакции сорбции

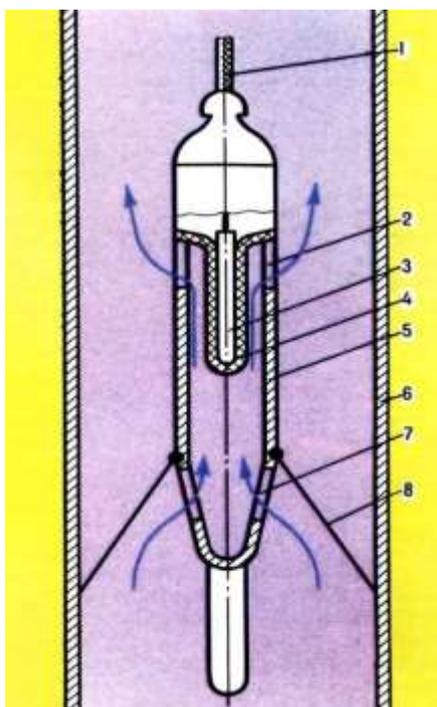


Рис. 3.9. Схема глубинного влагомера: 1 - кабель; 2 - выходные окна; 3 - внутренний электрод преобразователя; 4 - изоляция электрода; 5 - корпус прибора (наружный электрод); 6 - обсадная колонна; 7 - входные окна; 8 - пакер

Контрольные вопросы

1. Что такое влажность твердого вещества?
2. Что такое влажность газа?
3. В чем отличие абсолютной от относительной влажности?
4. Какие неэлектрические методы измерения влажности воздуха Вы знаете?
5. Как можно измерить влажность твердых веществ?
6. Расскажите о влагомере, работающем по методу сушки.
7. Расскажите о влагомерах, работающих по методу отражения.
8. Как работает игольчатый влагомер?
9. На каком принципе основана работа бесконтактных влагомеров?
10. Каков принцип работы ЯМР-влагомера?
11. Какие используются разновидности СВЧ-влагометрии?
12. Как можно измерить влажность газов?