

Министерство образования Республики Беларусь
Учреждение образования «Гомельский государственный
технический университет имени П. О. Сухого»

Кафедра «Промышленная теплоэнергетика и экология»

Е.Н. Макеева

МЕТРОЛОГИЯ И СТАНДАРТИЗАЦИЯ

курс лекций по одноименному курсу
для студентов специальности
1-43 01 05 «Промышленная теплоэнергетика»

Гомель 2023

ГЛАВА 1 ВВЕДЕНИЕ. ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Измерение физических величин является одним из способов познания окружающего нас мира и основным средством контроля различных технологических процессов. Технический прогресс, совершенствование технологических процессов, производство точных, надежных и долговечных машин и приборов, повышение качества продукции, обеспечение взаимозаменяемости и кооперирования производства невозможны без развития метрологии и постоянного совершенствования техники измерений.

Термин «метрология» произошел от греческих слов: «метрос» – мера, «логос» – учение, слово.

Метрология – наука об измерениях физических величин, методах и средствах обеспечения их единства.

Измерение физических величин имеет давнюю историю. Еще в средние века производились измерения времени, геометрических размеров и массы тел. В XVII столетии появились термометры для измерения температуры, манометры для измерения давления, барометры для определения атмосферного давления и пр. В XVIII и XIX вв. стали применяться динамометры для измерения силы, калориметры для измерения количества тепла и многие другие приборы, а также начали создаваться приборы для измерения электрических величин. Исключительно важные работы в области измерений, не потерявшие своего значения и в настоящее время, были выполнены гениальным русским ученым Д. И. Менделеевым (1834-1907 гг.), который является основоположником отечественной метрологии. Им, в частности, были произведены классические измерения длины, массы, давления, объема и других физических величин и установлены точные соотношения между прежними русскими и метрическими мерами, что облегчило в дальнейшем введение в нашей стране метрической системы мер. В 1893 г., когда для обеспечения в стране единообразия и правильности измерений была организована Главная палата мер и весов, Д. И. Менделеев был назначен первым ее руководителем.

Под **измерением** понимают нахождение значений физической величины опытным путем с помощью специально для этого предназначенных технических средств.

Основное уравнение измерения имеет вид:

$$Q=qU, \quad (1.1)$$

где Q – значение измеряемой величины,
 q – единица измерения,
 U – результат измерения.

Измерения производят как с целью установления действительных размеров изделий и соответствия их требованиям чертежа, так и для проверки точности технологической системы и наладки ее для предупреждения

появления брака.

Технические средства, имеющие нормированные метрологические свойства называются **средствами измерения**. К ним относятся следующие:

Эталоны единиц физических величин – средства измерений или комплексы средств измерений, официально утвержденные эталонами для воспроизведения единиц физических величин с наивысшей достижимой точностью, и их хранения (например, комплекс средств измерений для воспроизведения метра через длину световой волны). Примером точности эталонов может служить государственный эталон времени, погрешность которого за 30 тыс. лет не будет превышать 1 с.

Эталон должен обладать взаимосвязанными свойствами: воспроизводимостью, неизменностью и сличаемостью.

Воспроизводимость - возможность воспроизведения единицы физической величины (на основе ее теоретического определения) с наименьшей погрешностью для существующего уровня развития измерительной техники. Это достигается постоянным исследованием эталона в целях определения систематических погрешностей и их исключения путем введения соответствующих поправок.

Неизменность - свойство эталона удерживать неизменным размер воспроизводимой им единицы в течение длительного интервала времени, при этом все изменения, зависящие от внешних условий, должны быть строго определенными функциями величин, доступных точному измерению. Реализация этих требований привела к идее создания "естественных" эталонов различных величин, основанных на физических постоянных.

Сличаемость- возможность обеспечения сличения нижестоящих по поверочной схеме, в первую очередь вторичных эталонов, с наивысшей точностью для существующего уровня развития техники измерения. Это свойство предполагает, что эталоны по своему устройству и действию не вносят каких-либо искажений в результаты сличений и сами не претерпевают изменений при проведении сличения.

Эталоны классифицируют на **первичные, вторичные и рабочие**.

Первичный эталон — это эталон, воспроизводящий единицу физической величины с наивысшей точностью, возможной в данной области измерений на современном уровне научно-технических достижений. Первичный эталон может быть **национальным**(государственным) и **международным**.

Национальный эталон утверждается в качестве исходного средства измерения для страны национальным органом по метрологии. В России национальные (государственные) эталоны утверждает Госстандарт РФ.

Международные эталоны хранит и поддерживает Международное бюро мер и весов (МБМВ). Важнейшая задача деятельности МБМВ состоит в систематических международных **сличениях** национальных эталонов крупнейших метрологических лабораторий разных стран с международными

эталоны, а также и между собой, что необходимо для обеспечения достоверности, точности и единства измерений как одного из условий международных экономических связей. **Сличению** подлежат как эталоны **основных** величин системы СИ, так и **производных**. Установлены определенные периоды сличения. **Например, эталоны метра и килограмма сличают каждые 25 лет, а электрические и световые эталоны — один раз в 3 года.**

Первичному эталону соподчинены **вторичные и рабочие (разрядные)** эталоны. Размер воспроизводимой единицы вторичным эталоном сличается с государственным эталоном.

Вторичные эталоны (их иногда называют "**эталон-копии**") могут утверждаться либо Госстандартом РФ, либо государственными научными метрологическими центрами, что связано с особенностями их использования. Рабочие эталоны воспринимают размер единицы от вторичных эталонов и в свою очередь служат для передачи размера менее точному рабочему эталону (или эталону более низкого разряда) и рабочим средствам измерений.

Эталон-копия представляет собой вторичный эталон, предназначенный для хранения единицы и передачи ее размера рабочим эталонам. Он не всегда может быть физической копией государственного эталона.

Эталон сравнения — вторичный эталон, применяемый для сличения эталонов, которые по тем или иным причинам не могут быть непосредственно сличаемы друг с другом. Примером эталона сравнения может служить группа нормальных элементов, применяемая для сличения государственного эталона вольта России с эталоном вольта Международного бюро мер и весов.

Эталон-свидетель — вторичный эталон, применяемый для проверки сохранности государственного эталона и для замены его в случае порчи или утраты. Эталон-свидетель применяется лишь тогда, когда государственный эталон является невоспроизводимым.

Государственные эталоны всегда осуществляются в виде комплекса средств измерений и вспомогательных устройств, обеспечивающих воспроизведение единицы и в необходимых случаях ее хранение, а также передачу размера единицы вторичным эталонам. **Вторичные** же эталоны могут осуществляться в виде: а) **комплекса средств измерений**; б) **одиночных эталонов**; в) **групповых эталонов**; г) **эталонных наборов**.

Одиночный эталон состоит из одной меры, одного измерительного прибора или одной измерительной установки, обеспечивающих воспроизведение или хранение единицы самостоятельно без участия других средств измерений того же типа. **Примерами** одиночного эталона являются вторичные эталоны единиц массы — килограмма в виде платино-иридиевой и стальной гирь.

Групповой эталон состоит из совокупности однотипных мер, измерительных приборов или других средств измерений, применяемых как

единое целое для повышения надежности хранения единицы. **Примером** группового эталона служит эталон-копия вольта, представляющий собой группу из 20 нормальных элементов. Размер единицы, хранимой групповым эталоном, определяется как среднее арифметическое их значений, воспроизводимых отдельными мерами и измерительными приборами, входящими в состав группового эталона. Отдельные меры и измерительные приборы, входящие в групповой эталон, применяют в качестве одиночных рабочих эталонов, если это допустимо по условиям хранения единицы. Групповые эталоны могут быть постоянного и переменного составов. В групповые эталоны переменного состава входят меры и измерительные приборы, периодически заменяемые новыми.

Эталонный набор представляет собой набор мер или измерительных приборов, позволяющий хранить единицу или измерять величину в определенных пределах. Эти меры или измерительные приборы предназначены для различных значений или различных областей значений измеряемой величины. **Примером** эталонного набора является рабочий эталон единицы плотности жидкости в виде набора денсиметров, служащих для определения плотности жидкостей в различных участках диапазона. Подобно групповым эталонам эталонные наборы могут быть постоянного и переменного состава.

Государственные эталоны хранятся в метрологических институтах. Для проведения работ с государственными эталонами назначаются особые ответственные лица — ученые хранители эталонов. Вторичные эталоны используются в метрологических институтах и в других крупных органах Государственной метрологической службы.

Кроме **национальных эталонов** единиц физических величин существуют **международные эталоны**, хранимые в Международном бюро мер и весов. Программой деятельности Международного бюро предусмотрены систематические международные сличения национальных эталонов крупнейших метрологических лабораторий разных стран с международными эталонами и между собой. Эталоны метра и килограмма сличают раз в 25 лет, электрические и световые эталоны (вольта и ома, канделы и люмен) — раз в 3 года. Проводят также эпизодические международные сличения эталонов радия, других источников ионизирующих излучений, платиновых термометров сопротивления, температурных ламп и других.

Наглядным примером значимости государственных эталонов служит исторический факт. В царствование Петра Первого отлитые русскими “горе-мастерами” пушечные ядра не совпали по размеру с жерлами пушек. Разгневанный Петр незамедлительно издал Указ о наказании виновных. Одних нещадно били кнутом, других отправили в ссылку. В результате порядок был восстановлен — калибр ядер и диаметр пушек совпали. Их начали поверять на единых эталонных приборах.

Государственные эталоны — это уникальные физические приборы (или установки), при создании которых применяются новейшие технологии и

научно-технические разработки. Современные эталоны создаются на базе физических законов и констант, действующих в пределах нашей Вселенной. Такими постоянными величинами являются заряд электрона, постоянная Планка или скорость света. Каждый государственный эталон — это дорогостоящий продукт научно-технической мысли. Например, в Белорусском институте проблем энергетики сейчас создается национальный эталон измерения единицы теплоты. С его помощью будут проводить аттестацию и поверку тепловых счетчиков в республике. Стоимость создания этого эталона, включая расходы на строительство всех необходимых зданий и сооружений, составит около 1 млн долларов. Материальные затраты по созданию несложных эталонов обычно достигает 100–150 тыс. долларов. Измерения на государственных эталонах осуществляют ученые-хранители, ответственные за состояние и точность работы эталонов. Зачем же нужна такая точность показаний государственных эталонов? Например, сверх точность эталона времени и частоты (вплоть до миллионных долей секунды) востребована предприятиями систем связи, на телестудиях и радио. Для качественного выхода в эфир очень важно синхронизировать все задействованные передаче службы с погрешностью опережения или отставания выхода в эфир не более, чем на 10 в минус двенадцатой доли секунды. Однако для качественного выхода в эфир нужен опорный сигнал, который имеет стабильность на порядок выше. Такой сигнал вырабатывают в Белорусском государственном институте метрологии (БелГИМ), а затем по кабельным сетям передают потребителям. Стабильность эталонного сигнала составляет 10 в минус тринадцатой доли секунды. Национальные эталоны Республики Беларусь соответствуют уровню потребностей нашей экономики. Основная база эталонов государственного значения создана, хранится и используется в РУП «БелГИМ». На сегодняшний день в Беларуси официально зарегистрировано и утверждено 11 государственных эталонов, в России — 130, на Украине — 30, а вот в Литве работа по созданию национальных эталонов только началась. Самыми крупными в мире эталонными базами располагают Россия и США.

Как создаются эталоны

Первые государственные эталоны Республики Беларусь — эталон времени и частоты, эталон температуры и эталон переменного напряжения (вольта) — создавались в БелГИМ как отдельные проекты. Несколько позже появилась государственная программа "Стандарты", которая с 2001 года получила название "Эталоны Беларуси". Ежегодно из республиканского бюджета выделяются средства под разработку новых и модернизацию устаревших эталонов. В текущем году на эти цели будет направлено около 500 млн белорусских рублей. На долю государственных эталонов БелГИМ придется порядка 40—45% от этой суммы. Остальные средства будут направлены в другие научно-исследовательские институты: в Институт проблем энергетики, который находится в составе Академии наук РБ, в Белорусский государственный университет, а также в НИИ порошковой металлургии с

опытным производством. Вклад института в программу "Стандарты Беларуси" заключается не столько в финансировании, сколько в использовании человеческого фактора и того парка приборов, который находится в его распоряжении. БелГИМ выполняет большие объемы строительно-монтажных и ремонтных работ по созданию специальных помещений для хранения эталонов, в которых поддерживается постоянный температурный режим. Здесь приборы защищены от воздействия внешних электромагнитных полей, вибрации, пыли. Научно-исследовательская работа приносит огромную пользу, но капиталовложений требует немалых. Недавно по программе Госстандарта Республики Беларусь и МАГАТЭ в БелГИМ создали эталон для измерения радиоактивного излучения. Необходимое оборудование было поставлено МАГАТЭ, а специальный бетонный бункер (со стенами толщиной в 1 метр) институт изготовил за счет собственных средств. Пока оценить затраты по созданию этого эталонного комплекса можно весьма приблизительно. Но в общем, речь идет о сумме около 600 тыс. долларов, причем финансовые вложения БелГИМ составили не менее трети. В данный момент эталон представлен на утверждение в Государственный комитет по стандартизации, метрологии и сертификации Республики Беларусь. Что касается окупаемости таких капиталовложений, то специалисты БелГИМ подсчитали, что национальный эталон единицы переменного тока (вольта) окупил все затраты на его создание за 1,5 года. В том случае, если бы наши заводы возили свою измерительную эталонную технику для аттестации и калибровки за рубеж (к примеру, в Россию), это обошлось бы белорусским предприятиям намного дороже.

Стандартные образцы

Впрочем, эталонами измерений могут служить не только высокоточные приборы. В природе существует множество химических соединений (каменный уголь, калийная соль, железная руда, нефть и т.д.), измерить качественные характеристики которых с помощью эталонных приборов невозможно. Однако промышленным предприятиям необходимо оценить качество природного сырья. Каким образом это можно сделать? Понятно, что искусственно создать эталон природной железной руды или калийной соли просто невозможно. Поэтому за эталон природного вещества принимают стандартный (натуральный) образец той же железной руды или калийной соли. Ученые тщательно измеряют, записывают и утверждают все характеристики природного образца. В дальнейшем характеристики сертифицированного (аттестованного) образца служат предприятиям эталоном для настройки промышленных приборов при проверке качества сырья. В зависимости от возможностей страны количество стандартных образцов может быть совершенно разным. В Беларуси по программе "Стандарты Беларуси" создано порядка 100 типов стандартных образцов. В Институте порошковой металлургии разработана серия стандартных образцов алюминиевых сплавов. В Белорусском государственном университете созданы образцы химически

чистых веществ, а в БелГИМ — стандартные образцы концентрации радиоактивных веществ. В свете чернобыльской проблемы эти разработки особенно актуальны не только для Беларуси, но для Украины и России. С их помощью контролируют концентрацию радиоактивных веществ в сырье и продукции. Стандартные образцы позволяют повысить точность измерений при оценке соответствия продукции и сырья, а также позволяют одновременно снизить как издержки изготовителей, так и риск потребителей.

Метрологическое обслуживание

Характеризуя качество строительной продукции и услуг, специалисты часто употребляют термин — оценка соответствия продукции. Он означает сопоставление (сравнение) качественных характеристик товаров и услуг с международными требованиями. Все отечественные и импортные стройматериалы получают оценку соответствия в процессе сертификационных испытаний. Одним из обязательных условий выпуска качественных стройматериалов является то, что вся измерительная техника и приборы на предприятиях должны быть пригодными к эксплуатации, надежными и давать точные показания. В процессе сертификации продукция независимо от ее вида и категории значимости испытывается в равной степени тщательно. В основу оценки соответствия продукции положен следующий принцип. Продукция и сырье должны соответствовать единым нормативным требованиям. То есть обеспечивать безопасность жизни и здоровья потребителей, охрану окружающей среды. Государственный метрологический надзор за соблюдением на предприятиях республики установленных метрологических правил и норм осуществляет Государственный комитет по стандартизации, метрологии и сертификации Республики Беларусь (Госстандарт). Работа промышленных измерительных приборов подчинена букве Закона. В Республике Беларусь все средства измерений (будь то на производстве или в быту) должны соответствовать условиям эксплуатации, необходимой точности и показывать результаты измерений, выраженные в единицах, утвержденных Законом Республики Беларусь “Об обеспечении единства измерений” № 420 от 5 сентября 1995 года. Обязательной поверке подлежат средства измерений, используемые в промышленности, строительстве, гидрометеорологии, связи, коммунальном хозяйстве, на транспорте, в торговле, здравоохранении и в других сферах деятельности. В процессе поверки в Белорусском государственном институте метрологии определяют погрешность приборов, сравнивая их показания с показаниями соответствующих национальных эталонов. Институт проводит метрологическое обслуживание предприятий по следующей схеме. Предприятие-заказчик оформляет заявку на обслуживание. На основании заявки с предприятием заключается договор о том, что заказчик обязуется предоставить, а институт — осуществить поверку прибора в определенной спецификации. Поверка средств измерений — это последовательность обязательных операций, которые выполняют органы государственной метрологической службы и субъекты хозяйствования для

определения и подтверждения соответствия средств измерений (различных приборов и устройств), установленным в государстве требованиям. Для нас слово "проверка" более понятно, чем термин "поверка". Однако эти понятия хоть и созвучны, но несколько отличаются по смыслу. Слово "поверка" однокоренное слову "поверить". В этом и заключается его истинный смысл. После государственной поверки показаниям прибора можно верить. Гарантийный срок на поверочные услуги устанавливается в форме межповерочного интервала (интервала между плановыми поверками). В течение этого срока (при условии соблюдения правил эксплуатации) институт гарантирует заказчику работу прибора в пределах установленной нормы точности. Что касается межповерочного интервала, то для бытовых счетчиков электроэнергии он, к примеру, составляет 8 лет. По истечении межповерочного интервала приборы проходят очередную поверку. Чтобы читателю было понятно то, о чем идет речь, рассмотрим конкретный пример. С электричеством мы сталкиваемся повсеместно и в быту, и на производстве. А поскольку электроэнергия продукт дорогостоящий, то объемы ее производства и потребления нужно измерять высокоточными приборами. К приборам учета относятся счетчики электроэнергии, а также измерительные трансформаторы тока и трансформаторы напряжения. Погрешность обычных рабочих счетчиков составляет 1,5–2,5%. Учитывая эту погрешность, израсходовав 1 кВт электроэнергии, мы условно можем потребить либо 97,5, либо 102,5 Вт электроэнергии. Если суммировать все эти "минимальные" погрешности в масштабах народного хозяйства страны, то переплаченные деньги или неучтенные потери будут впечатляющими. Поэтому многие промышленные предприятия электросетей измеряют расход электроэнергии счетчиками, имеющими погрешность 0,5%. Есть счетчики и с большей точностью. Поверка высокоточных счетчиков должна проводиться на эталоне, который имеет минимальную погрешность 0,02 %.

Меры – средства измерений, предназначенные для воспроизведения физической величины заданного размера. К мерам относятся плоскопараллельные концевые меры длины, гири, конденсаторы постоянной емкости и т. п.

Образцовые средства измерений – это меры, измерительные приборы или преобразователи, утвержденные в качестве образцовых. Они служат для контроля нижестоящих по поверочной схеме измерительных средств, в то же время их периодически поверяют по эталонам. Точность образцовых средств измерения имеет большое значение для обеспечения единства измерений.

Рабочие средства измерений – это меры, устройства или приборы, применяемые для измерений, не связанных с передачей единицы физической величины (например, концевая мера длины, используемая для контроля размеров изделия или для наладки станков).

Передача размеров единицы физической величины от эталона к рабочим средствам измерения производится в соответствии с **поверочной схемой**,

устанавливающей средства, методы и точность передачи единицы размера.

Основные метрологические показатели средств измерения:

Деление шкалы прибора – промежуток между двумя соседними отметками шкалы.

Длина (интервал) деления шкалы – расстояние между осями двух соседних отметок шкалы.

Цена деления шкалы – разность значений величин, соответствующих двум соседним отметкам шкалы; например, 0,002 мм при длине (интервале) деления шкалы прибора, равной 1 мм.

Диапазон показаний (измерений по шкале) – область значений шкалы, ограниченная ее начальным и конечным значениями; например, диапазон показаний оптиметра $\pm 0,1$ мм.

Диапазон измерений – область значений измеряемой величины, в пределах которой нормированы допустимые погрешности средства измерений.

Предел измерений – наибольшее или наименьшее значения диапазона измерений.

Предел допустимой погрешности средства измерения – наибольшая (без учета знака) погрешность средства измерений, при которой оно может быть признано годным и допущено к применению.

Погрешность измерения – разность между результатом измерения и истинным значением измеряемой величины.

Точность измерений – характеристика качества измерений, отражающая близость к нулю погрешностей их результатов. При высокой точности погрешности всех видов минимальны.

Поверкой измерительного прибора называется сравнение его показаний с показаниями более точного прибора, производимое для определения погрешностей измерения.

1.1 Международная система единиц измерения

Международная система единиц (СИ – система интернациональная) принята на XI Генеральной конференции по мерам и весам в 1960 г. и дополнена на XIV Генеральной конференции в 1971 г.

Система СИ состоит из **основных, дополнительных и производных** единиц.

Основные единицы системы СИ:

метр (м) – длина, равная $1650763,73$ длин волн в вакууме излучения, соответствующего переходу между уровнями $2p_{10}$ и $5d_5$ атома криптона-86;

килограмм (кг) – масса, равная массе международного прототипа килограмма;

секунда (с) – время, равное $9\,192\,631\,770$ периодам излучения, соответствующего переходу между двумя сверхтонкими уровнями основного состояния атома цезия-133;

ампер (А) – сила неизменяющегося тока, который, проходя по двум параллельным прямолинейным проводникам бесконечной длины и ничтожно малого кругового сечения, расположенным на расстоянии 1 м один от другого в вакууме, создал бы между этими проводниками силу, равную $2 \cdot 10^{-7}$ Н на каждый метр длины.

кельвин (К) – термодинамическая температура Кельвина, единицей которой является $1/273,16$ часть термодинамической температуры тройной точки воды (точка равновесия между твердой, жидкой и газообразной фазами воды);

кандела (кд) – сила света, испускаемого с площади $1/600\,000$ м сечения полного излучателя, в перпендикулярном к этому сечению направлении, при температуре излучателя, равной температуре затвердевания платины при давлении 101325 Па;

моль (моль) – количество вещества, содержащее столько же молекул (атомов, частиц), сколько атомов содержится в нуклиде углерода-12 массой 0,012 кг.

В качестве **дополнительных единиц** приняты:

радиан (рад) – угол между двумя радиусами окружности, дуга между которыми по длине равна радиусу. Радиан равен $57^{\circ}17'44,8''$;

стерадиан (ср) – телесный угол, вершина которого расположена в центре сферы и который вырезает на поверхности сферы площадь, равную площади квадрата со стороной, по длине равной радиусу сферы.

Производные единицы системы СИ содержат: механические единицы (метр, килограмм, секунда), тепловые (метр, килограмм, секунда, градус), электрические и магнитные (метр, килограмм, секунда, ампер), световые (метр, секунда, свеча), акустические и др.

Наравне с единицами системы СИ допускается также использование наиболее распространенных в настоящее время единиц других систем. Кроме того, некоторые системные и внесистемные единицы допускаются к применению временно, впредь до их изъятия.

Если при измерениях и расчетах основные или производные единицы оказываются чрезмерно малы или велики, то пользуются кратными или дольными единицами, образуемыми путем умножения или деления единиц на степени числа 10.

1.2 Методы измерений

Измерения физических величин делятся на **промышленные** (технические) и **лабораторные**.

Промышленные измерения имеют сравнительно невысокую точность, достаточную для практических целей, и производятся приборами, устройство которых отвечает их назначению и условиям работы.

Лабораторные измерения отличаются высокой точностью благодаря применению более совершенных методов и приборов и учету возможных по-

грешностей. Этот вид измерений производится при выполнении научно-исследовательских, наладочных и поверочных работ.

Для определения значений измеряемой величины служат **прямые** и **косвенные** измерения.

Прямые измерения, характеризуемые равенством (1.1), заключаются в непосредственном сравнении измеряемой величины с единицей измерения при помощи меры или измерительного прибора со шкалой, выраженной в этих единицах. Так, например, к прямым относятся измерения длины – метром, давления – манометром, температуры – термометром и т. д. Благодаря наглядности и простоте прямые измерения получили в технике большое распространение.

Косвенные измерения предусматривают определение искомой величины Q не непосредственно, а путем прямого измерения одной или нескольких других величин: A , B , C , с которыми она связана функциональной зависимостью. При этом вычисление измеряемой величины производится по формуле:

$$Q=f(A,B,C,\dots) . (1.2)$$

Примерами косвенного измерения, применяемого в тех случаях, когда невозможно произвести прямое измерение или последнее является менее точным по сравнению с косвенным, служат: определение расхода вещества по перепаду давления в сужающем устройстве, количества воды в баке по уровню в указательном стекле и пр.

Методом измерений называется совокупность приемов использования принципов и средств измерений. Существует ряд методов измерений, из которых наиболее распространенными являются: **метод непосредственной оценки**, **метод сравнения с мерой** и **нулевой метод**.

Метод непосредственной оценки предусматривает определение искомой величины по отсчетному устройству измерительного прибора, например по положению указательной стрелки манометра относительно его шкалы.

Метод сравнения с мерой состоит в том, что измеряемая величина сравнивается со значением, воспроизводимым мерой для данной величины, например, при измерении длины калиброванным метром.

Нулевой метод является разновидностью метода сравнения с мерой. Здесь результирующее воздействие двух величин (измеряемой и воспроизводимой мерой), направленных навстречу друг другу, доводится до нуля. Примером может служить измерение массы вещества на рычажных весах с уравновешиванием ее калиброванными грузами.

1.3 Теплотехнические измерения и теплотехнический контроль

Теплотехнические измерения служат для определения многих физических величин, связанных с процессами выработки и потребления тепловой энергии. Они включают определение как чисто тепловых величин (температу-

ры, теплоты сгорания, теплопроводности и пр.), так и некоторых других (давления, расхода и количества, уровня, состава газов и пр.), играющих важную роль в теплоэнергетике.

Теплотехнические измерения широко применяются во многих отраслях народного хозяйства: в энергетике, металлургии, химии и др. В энергетической промышленности они используются для повседневного контроля и наблюдения за работой и состоянием установленного на электростанциях оборудования. Наряду с этим теплотехнические измерения необходимы при изучении и дальнейшем совершенствовании способов производства электрической и тепловой энергии и методов потребления тепла. Большую роль они играют и в устройствах автоматизации тепловых электростанций (автоматическом регулировании и управлении, технологической защите, сигнализации), где осуществляются с помощью специальных измерительных преобразователей.

Надежная и экономичная эксплуатация современных тепловых электростанций немыслима без применения значительного количества разнообразных по устройству, назначению и принципу действия приборов теплотехнического контроля. На этих электростанциях, оснащенных сложным энергетическим оборудованием, теплотехнический контроль органически связан с его работой и является весьма важным звеном управления.

В энергетических установках теплотехнические измерения служат для непрерывного производственного контроля за работой оборудования и называются **теплотехническим (тепловым) контролем**. Наряду с этим они широко применяются для проведения испытаний оборудования и выполнения научно-исследовательских и наладочных работ.

Современная тепловая электростанция является большим и сложным промышленным предприятием, вырабатывающим электрическую и тепловую энергию за счет сжигаемого в нем топлива.

При эксплуатации тепловой части электростанции производятся измерения ряда основных величин (давления, температуры, расхода и пр.) следующих рабочих веществ:

- пара свежего, вторично перегретого, отборного и отработавшего в турбине;
- воды питательной, охлаждающей, химически очищенной, продувочной, сетевой и конденсата;
- дымовых газов в топке и газоходах котлоагрегата;
- воздуха атмосферного и поступающего в топку котлоагрегата, а также воздуха или водорода, служащего для охлаждения турбогенератора;
- масла в системах смазки турбоагрегата, насосов, вентиляторов, дымососов, мельниц и в системе регулирования турбины;
- топлива твердого, жидкого и газообразного.

Осуществляются также измерения температуры металла труб котлоагрегатов, частей турбин и т. п.

Главной обязанностью дежурного персонала электростанции является обеспечение надежной и рациональной ее эксплуатации. Успешное выполнение этих задач, а также организация технического учета работы оборудования невозможны без повседневного контроля, осуществляемого посредством измерительных приборов различного назначения.

Теплотехнический контроль на электростанциях позволяет обеспечить:

- надежную и безопасную эксплуатацию установок;
- экономически наивыгоднейший режим работы оборудования;
- организацию технического учета работы агрегатов и электростанции в целом.

ГЛАВА 2 ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ

2.1 Основные свойства измерительных приборов

В зависимости от назначения, устройства и принципа действия измерительные приборы обладают различными метрологическими свойствами, которые в основном характеризуются точностью, чувствительностью, быстродействием и надежностью работы.

Точность измерительного прибора определяется степенью достоверности его показаний, т. е. тем, насколько результаты измерений отличаются от истинных значений измеряемой величины.

Чувствительность прибора выражается отношением линейного или углового перемещения указателя (стрелки, пера или уровня жидкости) к изменению измеряемой величины, вызвавшему это перемещение. Если обозначить Δl перемещение указателя прибора и ΔX – соответствующее изменение измеряемой величины, то чувствительность прибора S может быть определена по формуле:

$$S = \Delta l / \Delta X \quad (2.1)$$

Выражение (2.1) показывает, что чем меньшее отклонение измеряемой величины отмечается прибором, тем выше его чувствительность. Как видно, чувствительность обратно пропорциональна цене деления шкалы. Поэтому более высокой чувствительностью обладают приборы со шкалой, имеющей небольшую цену деления.

Быстродействие прибора зависит от его инерционности, вызывающей запаздывание показаний. Последнее характеризует время с момента начала изменения измеряемой величины до момента показания его прибором. Инерционность приборов в большинстве случаев вызывается тепловыми, механическими и гидравлическими факторами. Чем более быстродействующим является прибор, тем выше его качество.

Надежность прибора характеризует его свойство сохранять работоспособность в течение заданного времени. Под работоспособностью подразумевается состояние прибора, при котором он может выполнять свои функции в соответствии с установленными для него техническими требованиями. Часто в технической документации на прибор указывается вероятность безотказной его работы в заданном интервале времени.

Степень влияния на показания приборов неблагоприятных внешних условий (температуры, влажности и запыленности окружа-

ющего воздуха, вибрации и т. п.) также в известной мере определяет их качество.

2.2 Основные элементы измерительных приборов

Главными узлами измерительного прибора являются **измерительное** и **отсчетное** устройства. Первое из них непосредственно осуществляет измерение физической величины при помощи **чувствительного элемента** и при необходимости усиливает входной сигнал, а второе – показывает, записывает или интегрирует полученное значение.

Измерительное устройство приборов весьма различно и зависит от рода измеряемой величины (давление, температура и т. д.) и принципа действия прибора (механический, электрический и пр.). В большинстве случаев измерительное устройство состоит из **подвижной** и **неподвижной** частей. Перемещение подвижной части происходит под воздействием измеряемой величины на чувствительный элемент прибора.

Отсчетное устройство в зависимости от характера показаний приборов выполняется в виде: **шкалы** и **указателя** (показывающие приборы), **записывающего приспособления** и **диаграммной бумаги** (самопишущие приборы) и **счетного устройства** (интегрирующие приборы).

Шкала показывающего прибора состоит из ряда последовательно нанесенных на **плоском** или **профильном** (цилиндрическом) циферблате отметок (делений), соответствующих числовым значениям измеряемой величины.

Отметки и числа на циферблате называются **градуировкой** шкалы.

Шкала измерительных приборов бывает **прямолинейной**, **дуговой** и **круговой** (рис. 2.1).

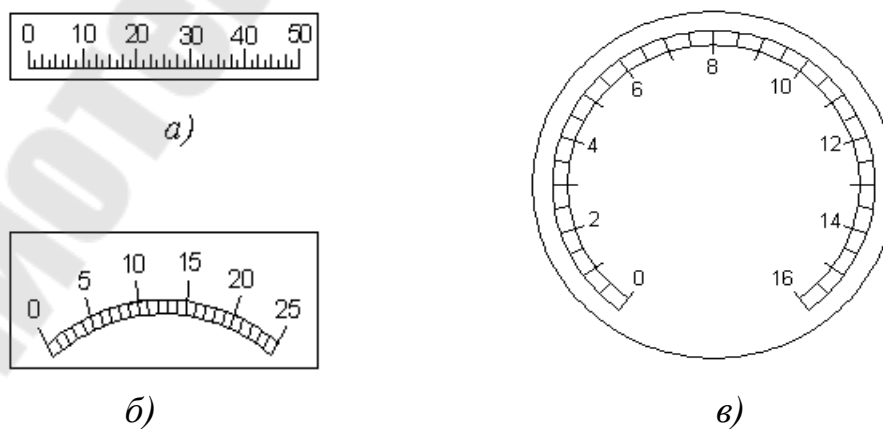


Рис. 2.1 Шкалы измерительных приборов:
а – прямолинейная; б – дуговая; в – круговая

Дуговая шкала имеет центральный угол меньше, а круговая – больше 180° . Кроме того, шкала может быть **равномерной** и **неравномерной** (рис. 2.2). Равномерная шкала имеет одинаковые расстояния между отметками и поэтому более удобна для измерений, чем неравномерная, у которой эти расстояния обычно изменяются по определенному закону (параболе, синусоиде и т. п.).

Если шкала прибора начинается с нуля, то она называется **односторонней**, если отметки расположены по обе стороны от нуля – **двусторонней**. Иногда измерительные приборы выполняются с **безнулевой** шкалой, начинающейся не с нуля, а с некоторого значения.

Приборы с одним диапазоном показаний имеют **однострочную** шкалу, а с многими – **двухстрочную**, **трехстрочную** и т. д.

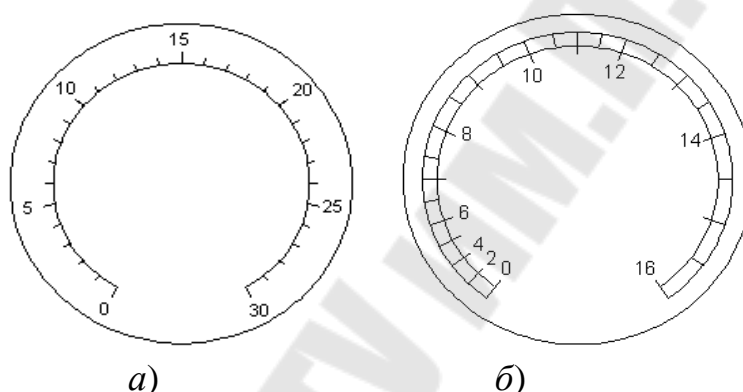


Рис. 2.2 Круговые шкалы приборов: *а* – равномерная; *б* – неравномерная

Указателем (рис. 2.3) у промышленных приборов служит хорошо заметная на расстоянии **клиновья** или **клиновья стержневая** стрелка, тогда как более точные приборы снабжаются **ножевой** стрелкой, конец которой имеет вид лезвия, расположенного нормально к плоскости шкалы.

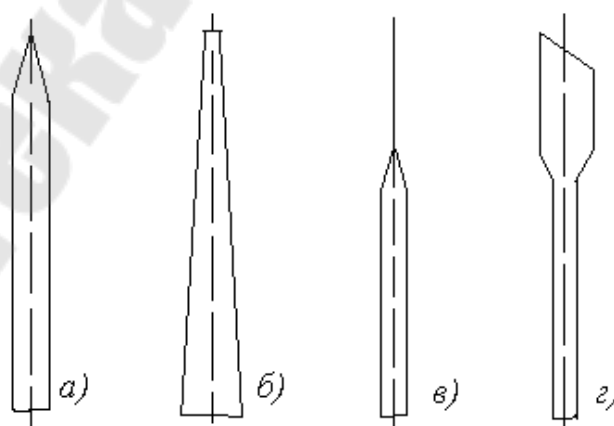


Рис. 2.3. Указательные стрелки приборов:
а – клиновья; *б* – клиновья стержневая; *в* – ножевая

У жидкостных стеклянных приборов указателем служит видимый **уровень** (мениск) жидкости в измерительной трубке (рис. 2.4). Если жидкостью

является вода или спирт, то из-за хорошей смачиваемости стенок образуется погнутый мениск и отсчет показаний производится по шпине его границе, а в случае применения ртути – выпуклый мениск, позволяющий производить отсчет по верхней его границе.

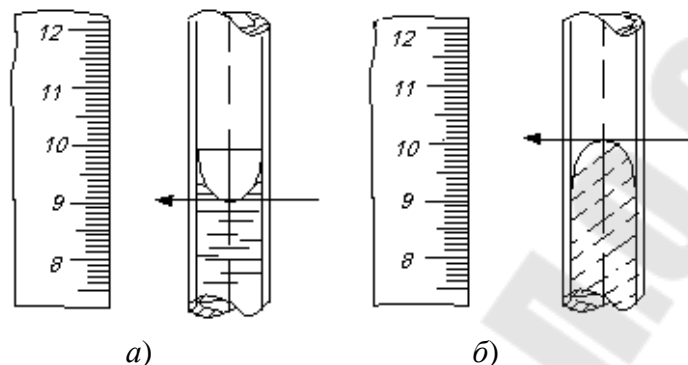


Рис. 2.4. Мениск жидкости в стеклянной измерительной трубке:
a – вогнутый; *б* – выпуклый

В самопишущих приборах применяются бумажные **диаграммные ленты** и **диски**.

Большинство измерительных приборов с дистанционной передачей показаний содержит в себе две самостоятельные части: **первичный измерительный преобразователь** (датчик) и **вторичный прибор**.

2.3 Классификация измерительных приборов

Основная классификация предусматривает деление приборов по **роду измеряемых величин**. Условно приняты следующие наименования наиболее распространенных приборов, предназначенных для измерения:

- температуры – **термометры** и **пирометры**;
- давления – **манометры**, **вакуумметры**, **мановакуумметры**, **тягомеры**, **напорометры** и **барометры**;
- расхода и количества – **расходомеры**, **счетчики** и **весы**;
- уровня жидкости и сыпучих тел – **уровнемеры** и **указатели уровня**;
- состава дымовых газов – **газоанализаторы**;
- качества воды и пара – **кондуктометры** и **кислородомеры**.

Дополнительная классификация подразделяет указанные приборы на следующие группы:

- по назначению – **промышленные** (технические), **лабораторные**, **образцовые** и **эталонные**;
- по характеру показаний – **показывающие**, **регистрирующие** (самопишущие и печатающие) и **интегрирующие**;
- по форме представления показаний – **аналоговые** и **цифровые**;

- по принципу действия – **механические, электрические, жидкостные, химические, радиоизотопные** и др.;
- по характеру использования – **оперативные, учетные и расчетные**;
- по местоположению – **местные и с дистанционной передачей показаний**;
- по условиям работы – **стационарные (щитовые) и переносные**;
- по габаритам – **полногабаритные, малогабаритные и миниатюрные**.

Почти каждый измерительный прибор может быть отнесен к любой из указанных выше групп. Так, например, термометр может быть промышленным, самопишущим, электрическим и т. д.

Промышленные приборы являются наиболее распространенными средствами измерений, применяемыми для практических целей, и обладают сравнительно простой и прочной конструкцией и высокой надежностью действия. Точность этих приборов, предназначенных для работы в неблагоприятных условиях (при наличии пыли, влаги, вибрации и т. п.), сравнительно невысока.

Лабораторные приборы служат обычно для точных измерений. Ими пользуются, как правило, при исследовательских и наладочных работах. Для получения большой точности измерений лабораторные приборы имеют тщательное выполнение, совершенные схемы и специальные приспособления для отсчета показаний. При пользовании этими приборами к их показаниям вносятся поправки, определяемые опытным или расчетным путем.

Эталонные и образцовые приборы служат главным образом для проверки средств измерений. Эталоны бывают **первичными** и **вторичными**. Наиболее точными являются первичные эталоны, которые служат государственными эталонами единиц измерений. Значения вторичных эталонов устанавливаются по первичным. Ко вторичным относятся также рабочие эталоны, применяемые для передачи размеров единиц образцовым мерам и приборам. Образцовые приборы используются для передачи путем поверки и градуировки правильных значений единиц измерения от эталонов к остальным приборам. Образцовые приборы бывают четырех разрядов, устанавливаемых в зависимости от их точности и способов поверки.

Аналоговые приборы дают показания в виде непрерывной функции измеряемой величины. К ним относятся, например, стрелочные показывающие и большинство самопишущих приборов.

Цифровые приборы имеют показания в виде отдельных дискретных сигналов измерительной информации в цифровой форме. В число этих приборов входят показывающие с цифровым отсчетом, печатающие и многие интегрирующие.

Оперативные приборы являются промышленными средствами измерений. По показаниям их производится управление работой производственных установок.

Учетные и расчетные приборы, служащие соответственно для технического учета работы установок и взаимных расчетов, бывают самопишущими и интегрирующими.

Местные приборы устанавливаются непосредственно в местах измерений. В большинстве случаев они предназначаются для менее ответственных наблюдений, а также для периодических измерений при пуске и остановке агрегатов.

Приборы с дистанционной передачей показаний на щиты управления являются основным видом промышленных приборов, обеспечивающих централизацию контроля за работой установок. Дальность передачи у этих приборов достигает 300-500 м.

2.4 Государственная система приборов

В целях широкого внедрения в народное хозяйство совершенной измерительной аппаратуры и рациональных устройств автоматизации технологических процессов существует единая государственная система промышленных приборов и средств автоматизации (ГСП). Эта система призвана обеспечить высокое качество изготавливаемых приборов и средств автоматизации, взаимозаменяемость устройств, значительное сокращение их номенклатуры (типажа) и уменьшение стоимости.

В зависимости от принципа действия приборов ГСП включает в себя ряд отдельных ветвей – электрическую, пневматическую, гидравлическую и др. Одной из основных задач ГСП является создание комплекса измерительных преобразователей с унифицированным выходным сигналом, поступающим на вторичные приборы.

ГЛАВА 3 ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ

3.1 Классификация погрешностей измерений

Измерение физических величин не может быть произведено абсолютно точно вследствие несовершенства методов и средств измерений, а также из-за влияния условий измерений, индивидуальных особенностей наблюдателя и ряда случайных причин. Возникающие при измерении физических величин отклонения результатов измерений от истинных значений измеряемой величины называются погрешностями измерений.

При каждом измерении должна быть известна степень точности его результата, оцениваемая погрешностью измерения. Погрешность измерения может быть выражена в виде абсолютной или относительной величины и бывает положительной или отрицательной.

Абсолютная погрешность Δ , выражаемая в единицах измерений, представляет собой разность между измеренным значением (показанием прибора) x и действительным значением измеряемой величины x_0 , а **относительная погрешность** δ , указываемая в процентах, есть отношение абсолютной погрешности к действительному значению, т. е.

$$\Delta = x - x_0 \quad (3.1)$$

$$\delta = 100 \Delta / x_0 \quad (3.2)$$

Измерительные приборы часто характеризуются **приведенной погрешностью**, которая определяется как отношение абсолютной погрешности измерительного прибора к нормирующему значению N . За нормирующее значение чаще всего принимается диапазон измерения прибора D . Приведенная погрешность, как правило, выражается в процентах:

$$\gamma = 100 \Delta / N = 100 \Delta / D \quad (3.3)$$

Обычно для определения действительного значения к показанию прибора вводится поправка c , которая численно равна абсолютной погрешности, взятой с обратным знаком:

$$\pm \Delta = \mp c \quad (3.4)$$

Поправка алгебраически складывается с результатом измерения:

$$x_0 = x + (\pm c) \quad (3.5)$$

Иногда для получения точного результата показания прибора умножаются на поправочный множитель k , т. е.

$$x_0 = k \cdot x \quad (3.6)$$

Значения Δ , c и k в большинстве случаев находятся опытным путем.

Погрешности измерений в зависимости от их характера делятся на **систематические, грубые, случайные и динамические**.

Систематическими погрешностями называются такие погрешности, которые при повторных намерениях одной и той же величины остаются постоянными или изменяются по определенному закону.

Систематические погрешности обычно слагаются из **основной** и **дополнительных** погрешностей.

Основная (инструментальная) погрешность зависит от назначения, устройства и качества изготовления измерительного прибора. Каждый, даже новый, прибор обладает основной погрешностью, которая с течением времени обычно возрастает за счет появления остаточных деформаций пружин, износа трущихся частей и др.

Дополнительные погрешности, возникающие из-за неправильной установки прибора, влияния неблагоприятных внешних условий (вибрации, высокой или низкой температуры и влажности окружающего воздуха, отклонения напряжения и частоты источника питания и пр.), применения несовершенного метода измерения и влияния индивидуальных особенностей наблюдателя могут составлять значительную величину.

Грубые погрешности связаны с факторами, заведомо и существенно искажающими результат измерения, например внезапным снижением напряжения электрического питания прибора. Сюда же относятся так называемые промахи – погрешности, связанные с ошибочными действиями наблюдателя, – неправильное определение показаний прибора, неверная их запись и т. п. Результаты измерений, содержащие грубые погрешности и промахи, отбрасываются как явно неточные.

Случайные погрешности являются заведомо неопределенными по своей величине и природе. При повторных измерениях они не остаются постоянными, так как возникают в итоге совместного воздействия на процесс измерения многих причин, каждая из которых проявляет себя по-разному и независимо друг от друга.

Большое число повторных измерений одной и той же постоянной величины показывает, что появление одинаковых по размеру и различных по знаку случайных погрешностей сохраняет устойчивую частоту, подчиняющуюся определенной закономерности. Если обозначить через n число проведенных измерений, а через m число полученных одинаковых случайных погрешностей, то вероятность (частота) P появления этих погрешностей находится по формуле:

$$P = m/n \quad (3.7)$$

Динамические погрешности

Измерительные приборы служат, как известно, для измерения изменяющихся во времени (переменных) величин и представляют собой материальные системы, обладающие различными инерционными свойствами (механическими, тепловыми и др.). Инерционность приборов при переменном режиме работы приводит к запаздыванию их показаний, т. е. к отставанию показаний от изменения измеряемой величины.

Величина запаздывания показаний зависит в основном от принципа действия и устройства измерительного прибора. На нее оказывают влияние инерция подвижной части прибора, теплоемкость и теплопроводность термочувствительного элемента и способ его установки, длина и диаметр соединительных трубок и пр.

Зависимость показаний прибора от изменения измеряемой величины в неустановившемся режиме (переходном процессе) называется **динамической характеристикой** измерительного прибора. Вид динамической характеристики определяется характером происходящего изменения (возмущения) измеряемой величины и типом измерительного прибора.

Динамическая характеристика приборов в большинстве случаев находится опытным путем.

3.2 Поверка измерительных приборов

Для нахождения основной погрешности в различных отметках шкалы прибора он через определенные сроки (или по мере необходимости) подвергается **поверке**, т. е. сравнению его показаний с показаниями точного прибора, имеющего в несколько раз меньшую погрешность измерения, чем поверяемый прибор.

Поверка приборов производится как на специальных лабораторных стендах, так и на рабочем месте. Порядок поверки различных приборов в лаборатории устанавливается соответствующими государственными стандартами и инструкциями, пользование которыми является обязательным. При поверке в лаборатории число поверяемых отметок шкалы для промышленных приборов составляет обычно 3-5, а для лабораторных и образцовых – не менее 10. Результаты поверки заносятся в протокол, на основании которого в случае пригодности прибора выписывается свидетельство. В этом документе помимо паспортных данных прибора для всех поверяемых отметок шкалы приводятся действительные значения и поправки. Кроме того, в свидетельстве указываются дата поверки и срок ее действия.

Поверка промышленных приборов на рабочем месте осуществляется параллельным подключением к ним лабораторных (переносных) приборов. Этот вид поверки является неполным, так как в большинстве случаев позволяет сравнить показания поверяемого прибора только в одной (рабочей) точке.

Характерными величинами являются **вариация показаний, непостоянство показаний и порог чувствительности** прибора.

Обычно поверку приборов производят вначале при возрастающем значении измеряемой величины (прямой ход), а затем при убывающем (обратный ход). Наибольшая разность показаний, полученная в этом случае при одном и том же значении измеряемой величины и неизменных внешних условиях, называется **вариацией показаний** прибора. Появление вариации обычно вызывается упругим или термическим последствием чувствительного элемента, тре-

нием подвижных частей, наличием зазоров (люфтов) в сочленениях механизма и пр.

Вариация показаний прибора в процентах диапазона:

$$v' = v / (N_k - N_n) 100, \quad (3.8)$$

где N_k и N_n – начальное и конечное значения шкалы.

Непостоянство показаний представляет собой разность между наибольшим и наименьшим показаниями прибора, соответствующими одному и тому же значению измеряемой величины при многократных поверках в одинаковых условиях.

Порог чувствительности выражает изменение значения измеряемой величины, вызывающее наименьшее изменение показаний прибора. Порог чувствительности зависит главным образом от наличия трения в измерительном устройстве прибора.

3.3 Допускаемые погрешности и класс точности приборов

Для каждого прибора в зависимости от его назначения, качества и диапазона показаний нормами устанавливается **допускаемая основная погрешность**, выражаемая в абсолютных или относительных (приведенных) величинах.

Допускаемая основная погрешность характеризует наибольшее возможное отклонение показаний прибора от действительного значения в обе стороны, в связи с чем перед ней ставятся знаки \pm . Если при поверке прибора основная погрешность в любой точке шкалы не превышает допускаемой, то прибор признается годным к применению. В противном случае он должен быть подвергнут ремонту или переградуировке.

Приведенная допускаемая основная погрешность δ' прибора определяется как отношение абсолютной допускаемой основной погрешности Δ' к диапазону показаний и выражается в процентах согласно равенству:

$$\delta' = \pm \Delta' / (N_k - N_n) 100. \quad (3.9)$$

Для измерительных приборов различного назначения приведенные допускаемые основные погрешности в среднем равны:

Промышленные приборы	($\pm 0,6-2,5$)% и более
Лабораторные, образцовые и эталонные приборы	$\pm 0,6$ % и менее

По приведенной допускаемой основной погрешности приборы разделяются на различные классы точности, условное обозначение которых соответствует размеру этой погрешности. Так, например, приборы, допускаемые основные погрешности которых равны $\pm 0,6$ и $\pm 1,5$ %, относятся соответственно к классам точности 0,6 и 1,5. Согласно государственному стандарту измерительные приборы могут иметь следующие классы точности: 0,01; 0,015; 0,02; 0,025;

0,04; 0,05; 0,06; 0,1; 0,15; 0,2; 0,25; 0,4; 0,5; 0,6; 1; 1,5; 2,5 и 4. Обычно класс точности указывается на циферблате прибора в кружочке.

Вариация показаний прибора нормально не должна превышать его абсолютной основной погрешности, непостоянство показаний – половины последней, а порог чувствительности – ее четверти.

ГЛАВА 4 ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ

4.1 Температурные шкалы

В энергетике весьма широк диапазон контролируемых температур и разнообразны условия их измерения, поэтому применяют разнообразные методы измерения и измерительные приборы. **Температура** характеризует степень нагретости тела, которая определяется внутренней кинетической энергией теплового движения молекул. Температуру можно определить как параметр теплового состояния. При контакте тел (газ, жидкость, твердое тело) теплота от одного из них переходит к другому до тех пор, пока значения средней кинетической энергии движения молекул этих тел не будут равны. Для сравнения степени нагретости тел используют изменение какого-либо физического их свойства, зависящего от температуры и легко поддающегося измерению (например, объемное расширение жидкости; изменение электрического сопротивления металла и т.д.).

Чтобы перейти к количественному определению температуры, необходимо установить шкалу температур, т.е. выбрать начало отсчета (нуль температурной шкалы) и единицу измерения температурного интервала (градус).

Температурные шкалы, применяемые до введения единой температурной шкалы, представляют собой ряд отметок внутри температурного интервала, ограниченного двумя легко воспроизводимыми постоянными (основными реперными или опорными) точками кипения и плавления химически чистых веществ. Эти температуры принимали равными произвольным числовым значениям t^1 и t^2 . Таким образом, $1 \text{ град} = \frac{t^2 - t^1}{n}$, где t^1 и t^2 – две постоянные легко воспроизводимые температуры; n – целое число, на которое разбит температурный интервал.

Для разметки температурной шкалы чаще всего использовали объемное расширение тел при нагревании, а за постоянные точки принимали температуры кипения воды и таяния льда. На этом принципе основаны температурные шкалы, созданные Ломоносовым, Фаренгейтом, Реомюром и Цельсием. При построении этих шкал была принята линейная зависимость между объемным расширением жидкости и температурой, т.е.

$$dt = kdV, \quad (4.1)$$

где k – коэффициент пропорциональности (соответствует относительному температурному коэффициенту объемного расширения).

Интегрирование уравнения (4.1) дает

$$t = kV + D, \quad (4.2)$$

где D – постоянная интегрирования.

Для определения постоянных k и D используют две выбранные температуры t^1 и t^2 . Приняв при температуре t^1 объем V^1 , а при температуре t^2 объем

$V_{t_0}^{|||}$, получим

$$t - t' = k(V - V') \quad (4.3)$$

Вычтя уравнение (4.3) из уравнений (4.2) и (4.4), получим

$$t - t' = k(V - V') \quad (4.5)$$

$$t - t' = k(V - V') \quad (4.6)$$

Разделив уравнение (4.5) на уравнение (4.6) и выполнив преобразование, получим

$$t = t' + \frac{V - V'}{V - V'} \cdot \frac{V - V'}{V - V'} \quad (4.7)$$

где t' и $t_0^{|||}$ – температура соответственно таяния льда и кипения воды при нормальном давлении и ускорении свободного падения $980,665 \text{ см/с}^2$;

V' и $V_{t_0}^{|||}$ – объемы жидкости, соответствующие температурам t' и $t_0^{|||}$;

V – объем жидкости, соответствующий температуре t .

Уравнение (4.7) называется **уравнением шкалы температур**.

В природе нет жидкостей с линейной зависимостью между коэффициентом объемного расширения и температурой, поэтому показания термометров зависят от природы термометрического вещества (ртути, спирта и т. п.).

С развитием науки и техники возникла необходимость в создании единой температурной шкалы, не связанной с какими-либо частными свойствами термометрического вещества и пригодной в широком интервале температур. В 1848 г. Кельвин, исходя из второго начала термодинамики, предложил определять температуру на основании равенства

$$T_2 / (T_2 - T_1) = Q_2 / (Q_2 - Q_1) \quad (4.8)$$

где T_1 и T_2 – температура соответственно холодильника и нагревателя;

Q_1 и Q_2 – количество теплоты, соответственно полученной рабочим веществом от нагревателя и отданной холодильнику (для идеальной тепловой машины, работающей по циклу Карно).

Пусть T_2 равно температуре кипения воды (T_{100}), а T_1 – температуре таяния льда (T_0); тогда, приняв разность $T_2 - T_1 = 100$ град и обозначив количества теплоты, соответствующие этим температурам, через Q_{100} и Q_0 , получим

$$T_{100} = Q_{100} \cdot 100 / (Q_{100} - Q_0) ; T_0 = Q_0 \cdot 100 / (Q_{100} - Q_0) .$$

При любой температуре нагревателя

$$T = Q \cdot 100 / (Q_{100} - Q_0) \quad (4.9)$$

Уравнение (4.9) является **уравнением термодинамической шкалы тем-**

ператур, которая не зависит от свойств термометрического вещества.

Решением XI Генеральной конференции по мерам и весам предусмотрено применение двух температурных шкал: **термодинамической** и **международной практической**.

В **термодинамической шкале Кельвина** нижней точкой является **точка абсолютного нуля** (0 К), а единственной экспериментальной основной точкой – **тройная точка воды**. Этой точке соответствует значение 273,16 К. Тройная точка воды (температура равновесия воды в твердой, жидкой и газообразной фазах) выше точки таяния льда на 0,01 град. Термодинамическую шкалу называют **абсолютной**, если в ней за нуль принята точка на 273,16 К ниже точки плавления льда.

Строго говоря, осуществить шкалу Кельвина невозможно, так как уравнение ее выведено из идеального цикла Карно. Термодинамическая шкала температур совпадает со шкалой газового термометра, заполненного идеальным газом. Известно, что некоторые реальные газы (водород, гелий, неон, азот) в широком интервале температур по своим свойствам сравнительно мало отличаются от идеального газа. Так, шкала водородного термометра (с учетом поправки на отклонение свойства реального газа от идеального) представляет собой практически термодинамическую шкалу температур.

Газовые термометры – весьма точные приборы для измерения температур, но работа с ними чрезвычайно сложна, а диапазон измерения температуры относительно узок. Они не получили широкого практического применения. В связи с этим возникла необходимость разработки такой практической температурной шкалы, которая, совпадая с термодинамической и одновременно позволяя расширить температурный диапазон, была бы удобна при измерениях и обеспечивала надежность воспроизведения.

Таковыми свойствами обладает **международная практическая температурная шкала**, основанная на ряде воспроизводимых равновесных состояний, которым соответствуют определенные значения температур (основные реперные точки), и на эталонных приборах, градуированных при этих температурах. Основные реперные точки реализуются как определенные состояния фазовых равновесий некоторых чистых веществ и охватывают интервал температур от -259,34 °С (тройная точка равновесия водорода) до +1064,43 °С (точка затвердевания золота).

Температуру, измеряемую по международной практической шкале, обозначают буквой t , а числовые значения сопровождают знаком °С.

По обеим шкалам (термодинамической и международной) температуру можно выразить как в К, так и в °С в зависимости от начала отсчета {положения нуля) по шкале. Температура по термодинамической шкале связана с температурой по международной практической шкале соотношением

$$T = t + 273,15 \quad (4.10)$$

На IX Генеральной конференции по мерам и весам в 1948 г. международная практическая температурная шкала была названа **шкалой Цельсия**. Для

международной практической шкалы температур и шкалы Цельсия общей является одна постоянная точка (температура кипения воды); во всех остальных точках эти шкалы существенно различаются, особенно при высоких температурах.

4.2 Классификация приборов для измерения температуры

Приборы для измерения температуры разделяются в зависимости от используемых ими физических свойств веществ на следующие группы:

Термометры расширения основаны на свойстве тел изменять под действием температуры свой объем.

Манометрические термометры работают по принципу изменения давления жидкости, газа или пара с жидкостью в замкнутом объеме при нагревании или охлаждении этих веществ.

Термоэлектрические термометры построены на свойстве разнородных металлов и сплавов образовывать в паре (спае) термоэлектродвижущую силу, зависящую от температуры спаея.

Термометры сопротивления основаны на свойстве металлических проводников изменять в зависимости от нагрева их электрическое сопротивление.

Пирометры работают по принципу измерения излучаемой нагретыми телами энергии, зависящей от температуры этих тел.

Диапазоны измерений:

- термометры расширения	-190-650 °С
- манометрические термометры	-160-600 °С
- термоэлектрические термометры	-50-1800 °С
- термометры сопротивления	-200-650 °С
- пирометры	300-6000 °С

4.3 Термометры расширения

Физическое свойство изменять свой объем в зависимости от нагрева широко используется для измерения температуры. На этом принципе основано устройство **жидкостных стеклянных** и **дилатометрических** термометров, которые появились очень давно и послужили для создания первых температурных шкал.

4.3.1 Жидкостные термометры

В жидкостных термометрах, построенных на принципе теплового расширения жидкости в стеклянном резервуаре в качестве рабочих веществ используются ртуть и органические жидкости – этиловый спирт, толуол и др. Наиболее широкое применение получили ртутные термометры, имеющие по сравнению с термометрами, заполненными органическими жидкостями, существен-

ные преимущества: большой диапазон измерения температуры, при котором ртуть остается жидкой, несмачиваемость стекла ртутью, возможность заполнения термометра химически чистой ртутью из-за легкости ее получения и пр. При нормальном атмосферном давлении ртуть находится в жидком состоянии при температурах от -39 (точка замерзания) до 357 °С (точка кипения) и имеет средний температурный коэффициент объемного расширения $0,18 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$.

Термометры с органическими жидкостями в большинстве своем пригодны лишь для измерения низких температур в пределах -190 - 100 °С. Основным достоинством их является высокий коэффициент объемного расширения жидкости, равный в среднем $1,13 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$, т. е. почти в 6 раз больший, чем у ртути.

Жидкостные термометры, изготавливаемые из стекла, являются местными показывающими приборами. Они состоят из резервуара с жидкостью, капиллярной трубки, присоединенной к резервуару и закрытой с противоположного конца, шкалы и защитной оболочки.

Ртутные термометры благодаря своей простоте, сравнительно высокой точности измерения, несложности обращения и дешевизне имеют весьма большое распространение и применяются для измерения температур в пределах от -35 до $+650$ °С.

Основная масса выпускаемых термометров по своей конструкции делится на две группы:

- 1) термометры с вложенной шкалой, у которых шкальная пластина вставлена внутрь оболочки и жестко скреплена с капилляром (рис. 4.1а);
- 2) термометры палочного типа, у которых шкала нанесена непосредственно на внешнюю поверхность толстостенного капилляра (рис. 4.1б).

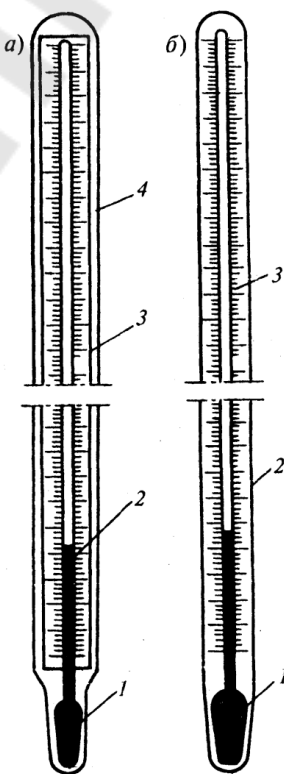


Рис. 4.1. Лабораторные ртутные термометры:

a – с вложенной шкалой: 1 – стеклянный резервуар; 2 – капилляр; 3 – шкальная пластина; 4 – стеклянная оболочка; *b* – палочный: 1 – резервуар; 2 – толстостенный капилляр; 3 – шкала на наружной поверхности капилляра

По назначению жидкостные термометры подразделяются на лабораторные, технические (производственные) и рабочие эталоны (образцовые). **Лабораторные** используются при научных исследованиях и градуируются при полном погружении. Их нижний предел измерения лежит внутри диапазона от -30 до 300 °С, верхний – внутри диапазона от 20 до 600 °С. Цена деления находится в пределах от $0,1$ до 2 °С. Предельная погрешность зависит от цены деления и диапазона измерения и находится в пределах от $0,3$ до 4 °С (она может превышать цену деления).

Технические термометры градуируются при погружении только суженной хвостовой части, которая может быть прямой и угловой (под углом 90 или 120 °). Они могут иметь специальное назначение (медицинские, метеорологические и т.д.) или особые технические характеристики (вибростойкие, электроконтактные). Допускаемая погрешность технических термометров зависит от цены деления и измеряемой температуры и может значительно превышать цену деления.

Образцовые термометры (для точных измерений типа ТР) имеют небольшой диапазон измерения, но независимо от пределов измерения имеют отметку 0 °С. При работе термометр погружается в контролируруемую среду на всю длину контролируемого столбика.

4.3.2 Дилатометрические термометры

К дилатометрическим термометрам относятся **стержневой** и **пластинчатый** (биметаллический) термометры, действие которых основано на относительном удлинении под влиянием температуры двух твердых тел, имеющих различные температурные коэффициенты линейного расширения.

Зависимость длины l твердого тела от его температуры t выражается равенством

$$l = l_0(1 + \alpha t), \quad (4.11)$$

где l_0 – длина тела при температуре 0 °С;

α – средний температурный коэффициент линейного расширения тела, K^{-1} .

Стержневой термометр (рис. 4.2*a*) имеет закрытую с одного конца трубку 1, помещаемую в измеряемую среду и изготовленную из материала с большим коэффициентом линейного расширения. В трубку вставлен стержень 2, прижимаемый к ее дну рычагом 3, скрепленным с пружиной 4. Стержень изготовлен из материала с малым коэффициентом расширения. При изменении температуры трубка изменяет свою длину, что приводит к перемещению в ней

стержня, сохраняющего почти постоянные размеры и связанного посредством рычага 3 с указательной стрелкой прибора.

Пластинчатый термометр (рис. 4.2б) состоит из двух изогнутых и спаянных между собой по краям металлических полосок, из которых полоска 1 имеет большой коэффициент линейного расширения, а полоска 2 – малый. Полученная пластинка меняет в зависимости от температуры степень своего изгиба, величина которого при помощи тяги 5, рычага 4 и соединенной с ним стрелки указывается по шкале прибора. При увеличении температуры пластинка изгибается в сторону металла с меньшим коэффициентом линейного расширения.

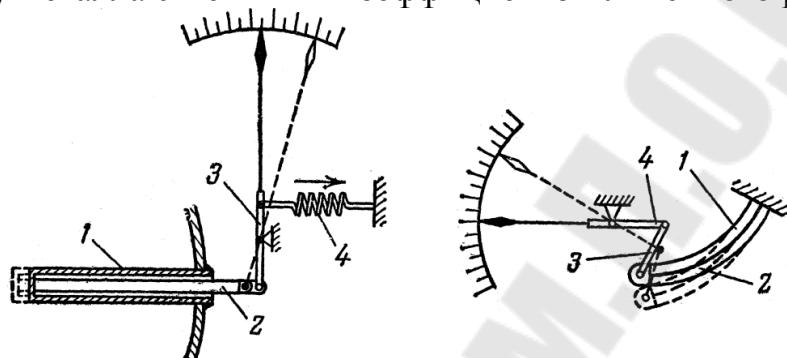


Рис. 4.2 Дилатометрические термометры:
а – стержневой; б – пластинчатый

Дилатометрические термометры не получили распространения как самостоятельные приборы, а используются главным образом в качестве чувствительных элементов в сигнализаторах температуры. Кроме того, пластинчатые термометры иногда применяются для компенсации влияния переменной температуры окружающего воздуха на показания других приборов, в которые они встраиваются.

4.3.3 Установка, поверка и поправки к показаниям термометров расширения

Точность показаний ртутного термометра, как и любого прибора, измеряющего температуру, зависит от способа его установки, т. е. от правильного решения вопросов, связанных с теплообменом между измеряемым веществом, термометром и внешней средой. Эта задача сводится к двум основным требованиям: во-первых, к обеспечению наиболее благоприятных условий передачи тепла от измеряемой среды чувствительной части (резервуару) термометра и, во-вторых, к уменьшению, по возможности отдачи тепла прибором окружающему воздуху.

Особенно большое влияние на точность измерений оказывает утечка тепла от термометра, что при жидкой измеряемой среде вызывается теплопроводностью частей прибора, а при газовой и паровой – еще дополнительным обменом тепла лучеиспусканием с окружающими поверхностями. Кроме того, вве-

денная в измеряемую среду чувствительная часть прибора в той или иной мере искажает окружающее температурное поле вследствие отвода тепла. В этих условиях измерение температуры не дает правильных результатов, так как показания прибора соответствуют его собственной температуре, отличающейся от температуры измеряемой среды. Неправильная установка термометра, дающая большую потерю тепла в окружающую среду, может привести к занижению его показаний на 10-15%.

Применяются два способа установки ртутных термометров: **в защитных оправках (или гильзах) и без них, т. е. путем непосредственного погружения термометров в измеряемую среду.**

Весьма распространенной является установка термометра в защитной гильзе (рис. 4.2), предохраняющей его от поломки и обеспечивающей необходимую плотность соединения в месте расположения прибора.

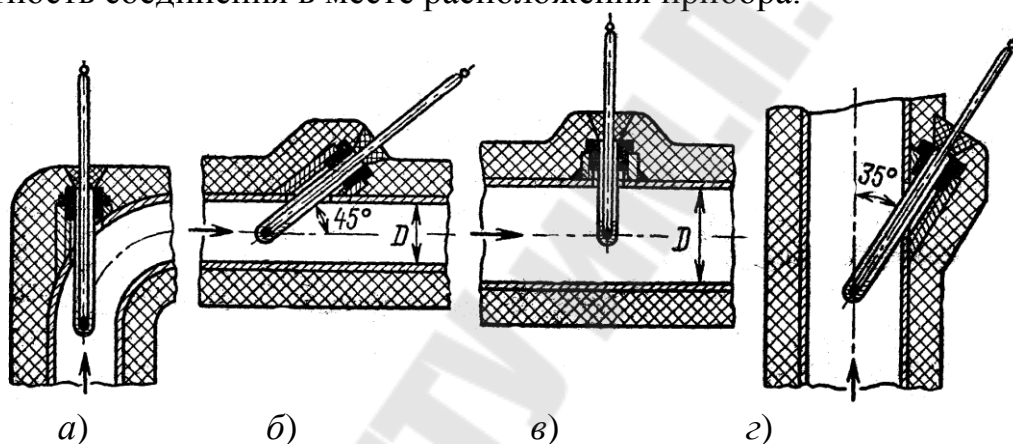


Рис. 4.2 Установка ртутного термометра в защитной гильзе:
a – вдоль оси трубопровода; *б* – наклонно к оси горизонтального трубопровода ($D \leq 200$ мм); *в* – нормально к оси горизонтального трубопровода ($D > 200$ мм); *г* – на вертикальном трубопроводе

При измерении температуры в трубопроводе термометр устанавливается в положение, при котором ось трубы проходит посередине резервуара. Погружение конца термометра до центра трубы, т. е. в зону наибольшей скорости потока, улучшает теплообмен между движущейся средой и прибором и уменьшает влияние на результаты измерения тепловых потерь защитной гильзы.

Наиболее правильной является установка термометра вдоль оси трубопровода на колене с восходящим потоком, так как при этом условия обтекания конца гильзы весьма благоприятны. На горизонтальном трубопроводе диаметром до 200 мм термометр устанавливается наклонно к оси Трубы навстречу потоку. При диаметре трубопровода более 200 мм термометр может быть расположен нормально, к оси трубы. На прямом вертикальном участке трубопровода с восходящим потоком термометр всегда устанавливается наклонно навстречу потоку. Устанавливать термометры на вертикальных трубопроводах с нисходящим потоком не рекомендуется.

Проверка термометров

Периодическая поверка технических и лабораторных ртутных термометров производится путем сравнения их показаний с показаниями образцовых термометров 2-го разряда, а также по реперным точкам плавления льда и кипения воды. Термометры поверяются в 3-5 отметках шкалы, расположенных через равные интервалы. При поверке термометров методом сравнения применяются термостаты с электрообогревом, заполняемые дистиллированной водой (с интервалом поверки до 99 °С), минеральным маслом (до 200 °С) или селитрой (до 550 °С). Поверка положения отметок 0 и 100 °С термометра производится соответственно в термостатах **плавления льда и кипения воды**. Для поверки термометров служат термостаты типов ТС-15м (водяной) и ТС-24 (водяной и масляный).

Поправки к показаниям ртутных термометров

При точных измерениях температур с помощью ртутных термометров к их показаниям вводятся следующие поправки:

- основная Δt ;
- на температуру выступающего столбика ртути Δt_g ;
- на смещение положения нулевой точки Δt_c .

Следовательно, в общем случае определение действительной температуры среды t по показаниям t_m ртутного термометра производится согласно равенству

$$t = t_m + \Delta t + \Delta t_g + \Delta t_c \quad (4.12)$$

Основная поправка принимается из свидетельства термометра.

Поправка на температуру выступающего столбика ртути вводится к показаниям только лабораторных и образцовых термометров в тех случаях, когда при измерении часть ртутного столбика намного выступает из защитной гильзы, а измеряемая температура значительно превышает температуру окружающего воздуха. Как отмечалось, указанные термометры градуируются и поверяются при условии, что ртутный столбик почти не выходит за пределы уровня жидкости в термостате, т. е. имеет ту же температуру, что и ртуть в резервуаре. При измерениях столбик, как правило, выступает наружу и имеет температуру, отличающуюся от температуры измеряемой среды. Это отступление от условий градуировки и поверки термометра требует введения к его показаниям поправки, определяемой по формуле

$$\Delta t_g = n \alpha_g (t_m - t_g) \quad (4.13)$$

где n – число градусов в выступающей части ртутного столбика;

α_g – температурный коэффициент видимого расширения ртути в стекле, K^{-1} ;

t_g – средняя температура выступающего столбика ртути, °С.

Температурный коэффициент видимого расширения ртути в стекле зависит от сорта термометрического стекла и может быть в среднем принят равным

0, $16 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$.

Поправка на смещение положения нулевой точки термометра периодически определяется в процессе эксплуатации с помощью термостата плавления льда.

В случае отклонения положения нуля от указанного в свидетельстве (после нагрева в термостате) эта поправка вычисляется по формуле

$$\Delta t_c = t_0 - t'_0, \quad (4.14)$$

где t_0 и t'_0 – температуры, соответствующие положению нулевой точки термометра по свидетельству (после нагрева в термостате) и после очередной поверки нуля в эксплуатации, °С.

4.4 Манометрические термометры

Принцип действия манометрических термометров основан на изменении давления газа, жидкости или насыщенного пара в замкнутом объеме в зависимости от температуры. Эти термометры широко применяются во взрывоопасных производствах и выпускаются такими фирмами как «Орлекс» (г. Орел), ОАО «МаноТомь» (г. Томск), Wika, Jumo (Germany) и др. Указанные термометры являются промышленными показывающими и самопишущими приборами, предназначенными для измерения температуры в диапазоне до 600° C . Класс точности их 1-2,5.

В зависимости от заключенного в термосистеме рабочего вещества манометрические термометры разделяются на **газовые, жидкостные и конденсационные**. Выбор рабочего вещества производится исходя из заданного диапазона показаний и условий измерения.

Схема показывающего манометрического термометра приведена на рис. 4.3. Термосистема прибора, заполненная рабочим веществом, состоит из термобаллона 1, погружаемого в измеряемую среду, манометрической трубчатой пружины 2, воздействующей посредством тяги 3 на указательную стрелку 4, и капилляра 5, соединяющего пружину с термобаллоном.

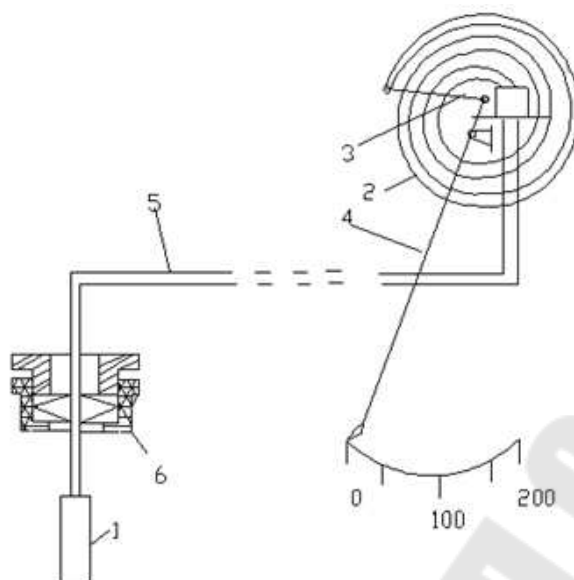


Рис. 4.3 Схема показывающего манометрического термометра

Газовые манометрические термометры применяются для измерения температур в интервале от -200 до 600 °С. Нижний предел измерения выбирается из интервала от -200 до 200 °С, верхний – из интервала от 50 до 600 °С, диапазон измерения находится в интервале от 100 до 700 °С. В качестве наполнителя используется гелий (при низких температурах), азот (при средних температурах) или аргон (при высоких температурах). Класс точности газовых термометров 1 или 1,5. Они могут выпускаться показывающими или самопишущими.

Жидкостные манометрические термометры находят небольшое распространение. Они используются для измерения температур в интервале от -50 до 300 °С. Нижний предел измерения выбирается из интервала от -50 до 100 °С, верхний – из интервала от 50 до 300 °С, диапазон измерения колеблется в пределах от 50 до 300 °С. В качестве термометрических жидкостей используется органическая полиметилсилоксановая жидкость ПМС-5 при низких температурах, при высоких – жидкость ПМС-10. Рабочее вещество жидкостных манометрических термометров практически несжимаемо. Поэтому изменение объема рабочей жидкости в термобаллоне при изменении температуры соответственно диапазону измерения вызовет такое увеличение давления в термосистеме, при котором манометрическая пружина изменит свой внутренний объем соответственно изменению объема жидкости. При этом давление зависит от жесткости пружины и для различных манометрических пружин может быть различным.

Конденсационные манометрические термометры используются для измерения температур в интервале от -25 до 300 °С. Нижний предел измерения выбирается из интервала от -25 до 100 °С, верхний – из интервала от 35 до 300 °С, диапазон измерения колеблется в пределах от 50 до 150 °С. Термобаллон термометра примерно на $3/4$ заполнен жидкостью с низкой температурой кипения, а остальная часть заполнена насыщенным паром этой жидкости. Капилляр и манометрическая пружина также заполнены жидкостью. Количество жидко-

сти в термобаллоне должно быть таким, чтобы при максимальной температуре не вся жидкость переходила в пар. В качестве термометрических жидкостей используется фреон-22 (при низких температурах), метил хлористый, этил хлористый, ацетон, толуол, спирт (в порядке возрастания пределов измерения).

Установка и поверка манометрических термометров

При установке манометрических термометров в трубопроводах термобаллон помещается в середину потока. Термобаллон газовых и жидкостных термометров может занимать любое положение, а конденсационных – вертикальное (капилляром вверх) или слегка наклонное. При измерении температуры среды, находящейся под большим давлением, термобаллон устанавливается в защитной гильзе с наполнителем.

Корпус прибора располагается в месте, свободном от вибрации, и защищается от радиации нагретых тел. При прокладке капилляра предусматривается защита его от механических повреждений. Крепление капилляра к опорным поверхностям производится при помощи крючков или скоб, без резких перегибов. Температура окружающей капилляр и пружину среды не должна превышать 60 °С.

Манометрические термометры поверяются на рабочем месте или в лаборатории. Поверка приборов в лаборатории производится в термостатах с электрообогревом, а на рабочем месте – при помощи сосудов с нагретой и холодной жидкостью (водой или маслом), смешиваемой до получения нужных температур. Для поверки в диапазоне температур 0-300 °С применяется образцовый ртутный термометр 2-го разряда, в диапазоне 300-600 °С – образцовый термометр сопротивления. Количество поверяемых отметок выбирается не менее трех – в начале, середине и конце шкалы.

4.5 Термоэлектрические термометры

Действие термоэлектрических термометров основано на свойстве металлов и сплавов создавать термоэлектродвижущую силу (термо-э.д.с), зависящую от температуры места соединения (спая) концов двух разнородных проводников (термоэлектродов), образующих чувствительный элемент термометра – термопару. Располагая законом изменения термо-э.д.с. термометра от температуры и определяя значение термо-э.д.с. электроизмерительным прибором, можно найти искомое значение температуры в месте измерения.

Термоэлектрический термометр, состоящий из двух спаянных и изолированных по длине термоэлектродов, защитного чехла и головки с зажимами для подключения соединительной линии, является первичным измерительным преобразователем.

В качестве вторичных приборов, работающих с термоэлектрическими термометрами, применяются **магнитоэлектрические милливольтметры и потенциометры.**

Термоэлектрические термометры широко применяются в энергетических

установках для измерения температуры перегретого пара, дымовых газов, металла труб котлоагрегатов и т. п. Положительными свойствами их являются: большой диапазон измерения, высокая чувствительность, незначительная инерционность, отсутствие постороннего источника тока и легкость осуществления дистанционной передачи показаний.

4.5.1 Основные свойства термоэлектрических термометров

В основу измерения температуры термоэлектрическими термометрами положен термоэлектрический эффект (явление Зеебека), заключающийся в том, что в замкнутой цепи термоэлектрического преобразователя (термопары), состоящего из двух или нескольких разнородных проводников (рис. 4.4), возникает электрический ток, если хотя бы два места соединения (спая) проводников имеют разные температуры. Спай, имеющий температуру t , погружаемый в измеряемую среду, называется **рабочим** концом, а спай, имеющий постоянную температуру t_0 – **свободным** концом. Проводники A и B называются **термоэлектродами**. Термоэлектрический эффект объясняется наличием в металле свободных электронов, число которых в единице объема различно для разных металлов.

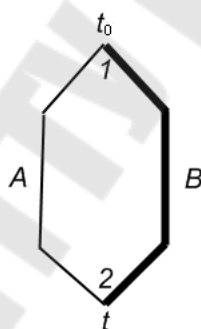


Рис. 4.4 Схема контура термоэлектрического термометра

При соединении одинаково нагретых концов двух проводников из разнородных материалов, из которых в первом количестве свободных электронов в единице объема больше, чем во втором, последние будут диффундировать из первого проводника во второй в большем числе, чем обратно. Таким образом, первый проводник станет заряжаться положительно, а второй – отрицательно. Образующееся при этом в месте соединения (спае) проводников электрическое поле будет противодействовать этой диффузии, в результате чего наступит состояние подвижного равновесия, при котором между свободными концами указанных проводников появится некоторая разность потенциалов (термо-э.д.с.). С увеличением температуры проводников значение этой термо-э.д.с. также увеличивается.

Кроме того, термо-э.д.с. возникает и между концами однородного проводника, имеющими разные температуры. В этом случае до наступления состояния подвижного равновесия положительно заряжается более нагретый конец

проводника как обладающий большей концентрацией свободных электронов по сравнению с концом, менее нагретым. Возрастание разности температур между концами проводника приводит к увеличению возникающей в нем термо-э.д.с.

Экспериментальная зависимость термо-э.д.с. $E_{AB}(t, t_0)$ от температуры рабочего конца t при постоянной температуре свободных концов t_0 , обычно равной $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, называется **градуировочной характеристикой** термоэлектрического термометра. На основании ее составляются градуировочные таблицы и графики для практического пользования.

Значение развиваемой термо-э.д.с. зависит от материала термоэлектродов и температуры рабочего и свободных концов термометра. В качестве термоэлектродов преимущественно применяются те металлы и сплавы, которые, отвечая одновременно и ряду других требований, развивают сравнительно большие термо-э.д.с. При измерениях температуру свободных концов термометра с целью увеличения термо-э.д.с. часто искусственно поддерживают на возможно более низком постоянном уровне. На практике при измерении температур широко используется техника «компенсации холодного спая»: температура холодного спая измеряется другим датчиком температуры, а затем величина термо-ЭДС холодного спая программно или аппаратно вычитается из сигнала термопары.

4.5.2 Термоэлектродные материалы

В качестве термоэлектродных материалов для изготовления термометров применяются главным образом чистые металлы и их сплавы. Выбор материала для термоэлектродов имеет существенное значение. Наряду с требованием создания большой термо-э.д.с. термоэлектроды должны по возможности обладать:

- постоянством термоэлектрических свойств независимо от изменения со временем внутренней структуры (рекристаллизации) и загрязнения поверхности;
- устойчивостью против действия высоких температур, окисления и других вредных факторов;
- хорошей электропроводимостью и небольшим температурным коэффициентом электрического сопротивления
- однозначной и по возможности линейной зависимостью термо-э.д.с. от температуры;
- однородностью и постоянством состава для обеспечения взаимозаменяемости термометров.

Наибольшее распространение для изготовления термоэлектрических термометров получили материалы: платина, платинородий, хромель, алюмель и копель. Для измерений в лабораторных установках находят также применение медь, железо и константан.

4.5.3 Типы и характеристики термоэлектрических термометров

Для получения сравнительно высоких значений термо- э.д.с. выбор термоэлектродов производится таким образом, чтобы в паре с платиной один из них создавал положительную, а другой отрицательную термо-э.д.с.

Термоэлектрические термометры, получившие практическое применение, разделяются по материалу термоэлектродов на две группы: из **благородных** и **неблагородных** металлов или сплавов. В табл. 4.1 приведены наиболее распространенные типы термоэлектрических термометров, материал термоэлектродов, диапазон рабочих температур, особенности применения.

Таблица 4.1

Термоэлектрические термометры

Наименование	Тип	Материал термоэлектродов		Диапазон рабочих температур	Особенности применения
		+	-		
1	2	3	4	5	6
Платинородий-платиновый	ТПП	Сплав платинородий (87% Pt +13% Rh)	Платина (Pt)	0-1300	Обладают хорошей устойчивостью к газовой коррозии, особенно на воздухе при высоких температурах; высокой надежностью при работе в вакууме; предназначены для длительной эксплуатации в окислительных средах. Недостаток: высокая чувствительность термоэлектродов к любым загрязнениям, появившимся при изготовлении, монтаже или эксплуатации термопар
Платинородиевый	ТПР	Сплав платинородий (70% Pt	Сплав платинородий (94% Pt	300-1600	- // - // -

		+30% Rh)	+6% Rh)		
Хромель-алюмелевый	ТХА	Сплав хромель (90,5% Ni +9,5 Cr)	Сплав алюмель (94,5% Ni + 5,5% Al, Si, Mn, Co)	-200-1000	Обладают наиболее близкой к прямой характеристикой; предназначены для работы в окислительных и инертных средах
Хромель-копелевый	ТХК	Сплав хромель (90,5% Ni +9,5 Cr)	Сплав копель (56% Cu + 44% Ni)	-200-600	Обладают наибольшей чувствительностью; высокой термоэлектрической стабильностью при температурах до 600 °С; предназначены для работы в окислительных и инертных средах. Недостаток – высокая чувствительность к деформациям

Продолжение таблицы 4.1

1	2	3	4	5	6
Вольфрамрениевый	ТВР	Сплав вольфрамрений (95% W +5% Re)	Сплав вольфрамрений (80% W +20% Re)	0-2200	Обладают возможностью длительного применения при температурах до 2200 °С в неокислительных средах; устойчивостью в аргоне, гелии, сухом водороде и азоте. Недостаток – плохая воспроизводимость термоЭДС

4.5.4 Устройство термоэлектрических термометров. Поверка

Для изоляции термоэлектродов и защиты их от вредного воздействия окружающей среды, а также для обеспечения прочности термометра и удобства его установки он имеет специальную арматуру, состоящую из электроизоляции, защитного чехла и головки с зажимами для присоединения внешних проводов,

Термоэлектроды термометра от спая до зажимов тщательно изолируются. В качестве изоляции применяются одно- или двухканальные трубки или бусы – из фарфора (до температуры 1300 °С) и окислов алюминия, магния или бериллия (свыше 1300 °С), надеваемые на термоэлектроды.

Защитный чехол термометра представляет закрытую с одного конца трубку, предохраняющую термоэлектроды от воздействия внешней среды. Он должен обладать устойчивостью против действия высокой температуры и резких ее колебаний, быть механически прочным и газонепроницаемым, а также не выделять при нагревании вредных для термоэлектродов газов и паров.

На рис. 4.5 показано устройство термометра типа ТПП-0555. Термоэлектроды, образующие рабочий конец 1, изолированы по длине фарфоровыми трубками 2 и 3 и помещены в защитный чехол 4. Для придания чехлу дополнительной прочности нерабочая часть его заключена в стальную трубку 5. При помощи стальных втулок 6 и 7 защитный чехол соединен с корпусом 8 водозащищенной бакелитовой головки, в которой закреплены два зажима 9 с припаянными к ним термоэлектродами, уплотненными герметизирующей мастикой 10. Корпус головки закрыт съемной крышкой 11 на резьбе, уплотненной прокладкой 12. Для ввода в головку внешних соединительных проводов служит штуцер 13 с уплотнением 14. На поверхности головки закреплена металлическая табличка 15, на которой указаны: тип термометра, допускаемые давление и конечная температура измеряемой среды, материал защитного чехла, дата изготовления термометра и марка предприятия-изготовителя.

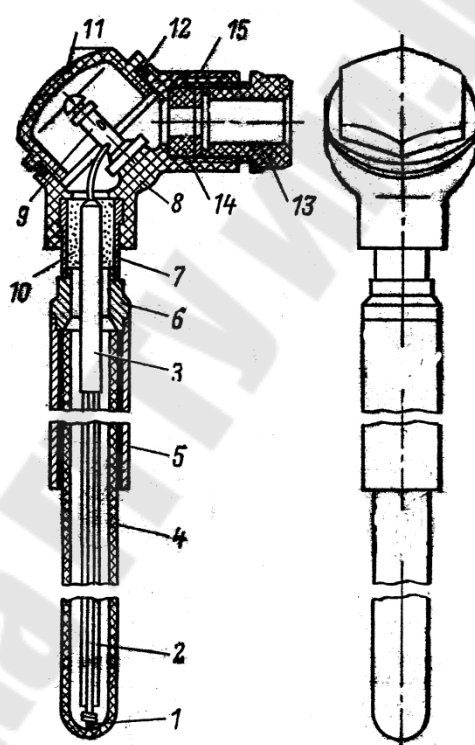


Рис. 4.5 Термоэлектрический термометр типа ТПП-0555

Проверка термоэлектрических термометров может производиться двумя способами: путем сравнения с показаниями образцового термометра и по реперным точкам равновесия фаз химически чистых веществ.

В первом случае проверку термометров до температуры 300 °С производят в водяном и масляном термостатах по образцовому ртутному термометру. В интервалах температур 300-1200 и 900-1800 °С термометры проверяются в трубчатой электропечи соответственно по образцовому платинородий-платиновому термометру. В процессе проверки температура свободных концов термометров поддерживается постоянной и равной 0 °С при помощи термостата плавления

льда. Измерение термоЭДС образцового и поверяемых термометров производится с помощью лабораторного потенциометра.

4.5.5 Магнитоэлектрические милливольтметры

Магнитоэлектрический милливольтметр является чувствительным вторичным прибором. Для измерения температуры шкала его градуируется непосредственно в °С.

Принцип действия и устройство милливольтметра

Работа милливольтметра основана на взаимодействии магнитного поля, образуемого проводником, по которому протекает электрический ток, создаваемый термоэлектрическим термометром, с магнитным полем находящегося в приборе постоянного магнита.

Проводник в виде прямоугольной рамки (рис. 4.6), состоящей из нескольких витков тонкой изолированной проволоки и могущей поворачиваться на опорах вокруг вертикальной оси $O—O$, помещается в магнитное поле постоянного магнита параллельно силовым линиям.

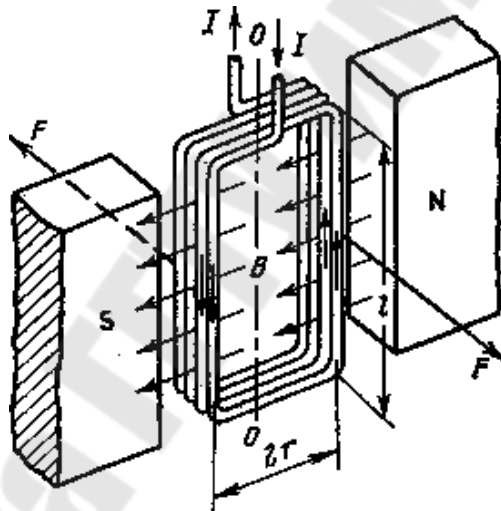


Рис. 4.6 Схема рамки магнитоэлектрического милливольтметра

При прохождении тока через рамку появляется магнитное поле, перпендикулярное ее плоскости, которое, взаимодействуя с полем основного магнита, образует две одинаковые силы F , действующие согласно правилу левой руки на боковые (активные) стороны рамки в противоположных направлениях. Сила F (Н) находится из выражения

$$F = n l B I, \quad (4.15)$$

где n — число витков рамки;

l — активная высота рамки, м;

B — магнитная индукция, Т;

I — сила тока, А.

В результате на рамку воздействует вращающий момент M_6 (Н·м), определяемый по формуле

$$M_6 = 2rF, \quad (4.16)$$

где r – радиус рамки, м.

Под влиянием этого момента рамка стремится повернуться вокруг оси до совпадения по направлению ее магнитного поля с полем постоянного магнита. Движение рамки вызывает закручивание скрепленной с ней одним концом спиральной пружинки, противодействующей повороту рамки.

Устройство магнитоэлектрического милливольтметра показано на рис. 4.7.

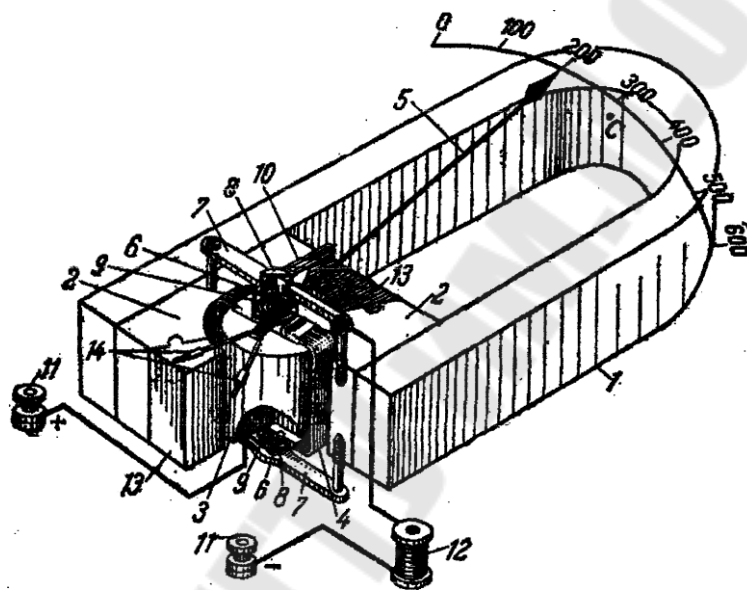


Рис. 4.7 Устройство магнитоэлектрического милливольтметра

Подковообразный постоянный магнит 1 из легированной стали снабжен полюсными наконечниками 2 с цилиндрической выточкой, между которыми неподвижно укреплен цилиндрический сердечник 3. В кольцевом воздушном зазоре шириной около 2 мм, образованном полюсными наконечниками и сердечником, изготовленными из мягкой литой стали, расположены боковые стороны подвижной рамки 4, состоящей из 100-300 витков медной или алюминиевой изолированной проволоки диаметром 0,07-0,08 мм.

Рамка, жестко скрепленная с указательной стрелкой 5, образует подвижную часть прибора, которая может поворачиваться вокруг оси сердечника благодаря сидящим в рамке с торцевых сторон двум стальным кернам 6, опирающимся на укрепленные в стойке 7 агатовые подпятники 8. Рядом с кернами диаметром около 1 мм и углом заточки 60° расположены две спиральные пружинки 9 из бериллиевой бронзы, внутренние концы которых прикреплены к рамке, а наружные у верхней пружинки – к оси рычага 10 и у нижней – к штифту неподвижной стойки. С этими же пружинками соединены концы об-

мотки рамки и два зажима 11, служащие для подключения термоэлектрического термометра.

Последовательно с рамкой включен добавочный манганиновый резистор 12, определяющий заданный диапазон показаний прибора. В свободное пространство между полюсными наконечниками помещены немагнитные вкладыши 13. Указательная стрелка прибора, выполненная из алюминиевой трубки, уравнивается передвижными противовесами 14, сидящими на двух балансировочных усиках с нарезкой. Благодаря противовесам центр тяжести подвижной части располагается по оси сердечника (рамки).

При соединении милливольтметра с термоэлектрическим термометром через рамку, резистор и спиральные пружинки протекает ток, вызывающий поворот рамки и стрелки вокруг оси сердечника. Одновременно с перемещением рамки происходит закручивание спиральных пружин, создающих противодействующий момент, величина которого по мере увеличения угла поворота рамки возрастает и приводит подвижную часть в состояние равновесия. Таким образом, угол поворота рамки (стрелки) прибора, равный углу закручивания пружин, зависит от силы тока, которая в свою очередь определяется термо-э.д.с. термометра.

Магнитоэлектрические приборы высокой чувствительности называются **гальванометрами** и применяются для определения разности потенциалов между двумя точками электрической цепи или отсутствия тока в каком-либо участке цепи (нулевые гальванометры).

Сопротивление измерительной цепи милливольтметра

Общее сопротивление измерительной цепи R складывается из сопротивлений милливольтметра R_m и внешней соединительной линии (включая сопротивление термоэлектрического термометра) R_l т. е.

$$R = R_m + R_l \quad (4.17)$$

Значение этого сопротивления может быть измерено или подсчитано.

Электрическое сопротивление цилиндрического проводника $R_{пр}$ (Ом) при температуре 0°C определяется по формуле:

$$R_{пр} = 1,274 l \rho / d^2, \quad (4.18)$$

где l – длина проводника, м;

ρ – удельное электрическое сопротивление проводника, Ом·мм²/м;

d – диаметр проводника, мм.

Сопротивление милливольтметра R_m , складывается из сопротивлений рамки R_p и добавочного резистора R_δ , включенного в цепь рамки, т. е.

$$R_m = R_p + R_\delta \quad (4.19)$$

Сопротивление добавочного резистора служит для подгонки заданного диапазона показаний и уменьшения влияния на прибор колебаний температуры окружающего воздуха. Добавочный резистор понижает температурный коэффициент электрического сопротивления милливольтметра α_m , который определяется по формуле

$$\alpha_m = \alpha_p R_p / (R_p + R_d) \quad (4.20)$$

где α_p – температурный коэффициент рамки прибора, равный $4,26 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$.

Сопротивление внешней линии R_l устанавливается в зависимости от типа термоэлектрического термометра равным 0,6; 5 или 15 Ом (при этом сопротивлением самого термометра пренебрегают).

Поправки к показаниям милливольтметров

При измерении температуры магнитоэлектрическим милливольтметром в комплекте с термоэлектрическим термометром к показаниям милливольтметра вводятся следующие поправки:

- основная;
- на изменение температуры свободных концов термометра;
- на изменение сопротивления измерительной цепи милливольтметра.

Основная поправка учитывает погрешность показаний милливольтметра, возрастающую вследствие появления остаточных деформаций спиральных пружинок или растяжек, износа трущихся частей и т. п. Значения основной поправки устанавливаются в результате поверки милливольтметра. Практически при измерениях поправка на температуру свободных концов в случае ее постоянства может вводиться путем перестановки корректором нуля указательной стрелки отключенного от термометра милливольтметра на отметку шкалы, отвечающую новой температуре свободных концов.

Электрическое сопротивление измерительной цепи милливольтметра возрастает с повышением температуры окружающего воздуха, что приводит к уменьшению показаний прибора при той же термо-э.д.с. термометра. Градуировка шкалы милливольтметра производится при нормальной температуре воздуха, равной $20 \text{ }^\circ\text{C}$. Несоблюдение этого условия при измерении требует введения поправки, для чего в новых условиях определяется общее сопротивление измерительной цепи.

4.5.6 Потенциометры

Измерение температуры термоэлектрическим термометром в комплекте с милливольтметром в большинстве случаев не обеспечивает достаточной точности из-за наличия ряда погрешностей. Класс точности такого прибора 1,5-2,5. Основной причиной этого является влияние изменений температуры окружающего воздуха на сопротивления милливольтметра и внешней соединительной линии. Это влияние отсутствует при измерении термо-э.д.с. **нулевым** (компен-

сационным) методом, при котором вместо милливольтметра применяется **потенциометр**. Кроме того, применение потенциометра позволяет легко осуществить автоматическое введение поправки на изменение температуры свободных концов термометра.

Основной особенностью потенциометра является то, что в нем развиваемая термоэлектрическим термометром термо-э.д.с. уравнивается (компенсируется) равным по величине, но обратным по знаку напряжением от источника тока, расположенного в приборе, которое затем измеряется с большой точностью.

Потенциометры являются наиболее совершенными вторичными приборами для работы с термоэлектрическими термометрами. Благодаря высокой точности они широко применяются при промышленных и лабораторных измерениях.

На рис. 4.8 изображена упрощенная схема лабораторного потенциометра с постоянной силой рабочего тока. Ее рассмотрение позволяет разобрать основные черты компенсационного метода измерения термоЭДС, которые характерны и для автоматических потенциометров. Схема рассматриваемого прибора содержит три контура: *A* – рабочего тока I ; *B* – нормального элемента НЭ; *C* – измеряемого сигнала $E(t, t_0)$.

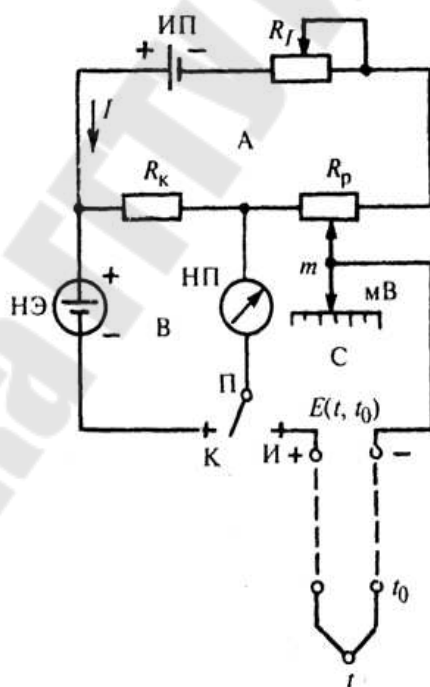


Рис. 4.8 Схема лабораторного потенциометра с постоянной силой рабочего тока

В контур рабочего тока входят источник питания ИП, реостат регулировки тока R_1 , контрольное сопротивление R_k и реохорд R_p . Высокочувствительный гальванометр НП, выполняющий функции нуля-прибора, подключается в положении К переключателя П к цепи нормального элемента, а в положении И – к цепи измеряемого сигнала.

Одним из основных факторов, определяющих высокую точность измерения напряжения, является обеспечение постоянства рабочего тока строго определенного значения. Для контроля за значением рабочего тока используется электрохимический нормальный элемент (рис. 4.9), который является источником высокостабильной ЭДС, составляющей 1,086 В.

Он состоит из H-образного стеклянного сосуда с впаянными в дно выводами из платиновой проволоки. Положительным электродом является ртуть, а отрицательным – амальгама кадмия. Электролитом служит насыщенный при 4 °С раствор серноокислого кадмия.

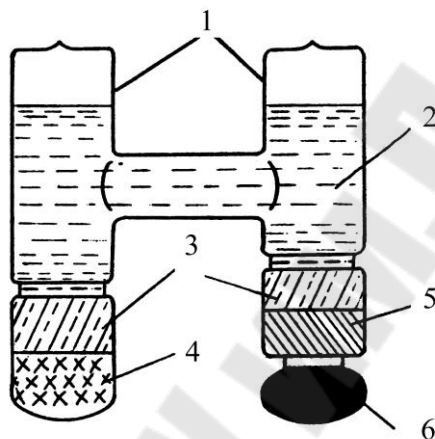


Рис. 4.9 Насыщенный нормальный элемент.

1 – стеклянная оболочка, 2 – насыщенный раствор сульфата кадмия, 3 – кристаллы сульфата кадмия, 4 – амальгама кадмия, 5 – сульфат ртути, 6 – ртуть

Нормальные элементы даже кратковременно нельзя нагружать током более 1 мкА. Для установки рабочего тока выполняется операция контроля, при которой замыкается цепь нормального элемента. Ток через нуль-прибор будет отсутствовать ($I_{\text{нп}}=0$), если $E_{\text{нэ}} = IR_{\text{к}}$. При выполнении этого условия рабочий ток составит $I = E_{\text{нэ}} / R_{\text{к}}$. Если при операции контроля рабочего тока нуль-прибор показывает наличие тока ($I_{\text{нп}} \neq 0$), то установка требуемого значения рабочего тока, при котором $I_{\text{нп}}=0$, производится изменением сопротивления R_1 . После установления рабочего тока нуль-прибор подключают к цепи измеряемого сигнала, переместив переключатель «П» в положение «И». Реохорд служит делителем напряжения. Если движок реохорда находится в крайнем левом положении, тот $m=0$, и снимаемый с реохорда сигнал $mR_p I = 0$, в крайнем правом положении $m=1$ и снимаемый с реохорда сигнал составит $R_p I$. При произвольном положении движка реохорда этот сигнал составляет $mR_p I$. С движком реохорда связана показывающая стрелка, что позволяет при известном токе I шкалу потенциометра проградуировать в мВ. При измерении напряжения ток через нуль-прибор будет отсутствовать ($I_{\text{нп}}=0$), если $E(t, t_0) = mR_p I$. В против-

ном случае, если $I_{\text{нп}} \neq 0$, то перемещают движок реохорда в такое положение, при котором выполняется равенство $I_{\text{нп}} = 0$ и $E(t, t_0) = mR_p I$. Последнее уравнение называют **уравнением компенсации**.

От расположенного в потенциометре гальванометра требуется только высокая чувствительность, точность же его значения не имеет, так как он служит не для измерения, а лишь для обнаружения тока, т.е. в качестве **нулевого индикатора**.

Выпускаются потенциометры двух видов: **автоматические** (промышленные) и **лабораторные** (переносные и образцовые).

4.6 Термометры сопротивления

Для измерения температуры широкое применение получили термометры сопротивления, действие которых основано на изменении электрического сопротивления металлических проводников в зависимости от температуры. Металлы, как известно, увеличивают при нагреве свое сопротивление. Следовательно, зная зависимость сопротивления проводника от температуры и определяя это сопротивление при помощи электроизмерительного прибора, можно судить о температуре проводника.

Термометр сопротивления, чувствительный элемент которого состоит из тонкой спиральной проволоки (обмотки), изолированной и помещенной в металлический защитный чехол с головкой для подключения соединительных проводов, является первичным измерительным преобразователем, питаемым от постороннего источника тока.

В качестве вторичных приборов, работающих с термометрами сопротивления, применяются **уравновешенные и неуравновешенные измерительные мосты** и **магнитоэлектрические логометры**.

4.6.1 Основные свойства термометров сопротивления

Конечный предел измерений проволочных термометров сопротивления, обусловленный стойкостью их при нагреве, равен 650°C .

Достоинствами термометров сопротивления являются: высокая точность измерения, возможность получения приборов с безнулевой шкалой на узкий диапазон температур, легкость осуществления автоматической записи и дистанционной передачи показаний и возможность присоединения к одному вторичному прибору при помощи переключателя нескольких однотипных термометров. К недостаткам этих приборов относится потребность в постороннем источнике тока.

Металлы, применяемые для изготовления обмотки термометров сопротивления, должны обладать:

- устойчивостью при нагревании, в частности однозначностью зависимости сопротивления от температуры и стойкостью проводника против коррозии, обеспечивающими надежность измерения;

- высоким и по возможности постоянным температурным коэффициентом электрического сопротивления, дающим высокую чувствительность прибора и линейное изменение сопротивления проводника от температуры;

- большим удельным сопротивлением, позволяющим изготавливать термометры малых размеров;

- воспроизводимостью степени чистоты металла при отдельных его плавках, обеспечивающей взаимозаменяемость термометров.

Из числа чистых металлов наиболее пригодными для изготовления термометров сопротивления являются платина (*Pt*) и медь (*Gu*).

4.6.2 Типы и характеристики термометров сопротивления

Платиновые термопреобразователи сопротивления (ТСП) могут иметь следующие сопротивления при 0 °С: 1, 5, 10, 50, 100 и 500 Ом, и поэтому имеют следующее обозначение номинальных статических характеристик 1П, 5П, 10П, 50П, 100П и 500П. ТСП используются для измерения температуры в интервале (-260... 1100) °С и являются наиболее распространенным типом ТС. При выборе ТСП следует использовать общий принцип – низкоомные ТС необходимо применять для измерения высоких температур, а высокоомные – для измерения низких температур.

Кроме того, при использовании высокоомных ТСП влияние изменения сопротивления внешней линии сказывается меньше, чем при использовании низкоомных. Недостатком платиновых ТС является нелинейность статической характеристики, особенно в области высоких и отрицательных температур, возможность загрязнения платины при высоких температурах, подверженность воздействию восстановительных и агрессивных газов. В интервале температур (0...600) °С зависимость сопротивления от температуры описывается нелинейным выражением

$$R_t = R_0 (1 + At + Bt^2) \quad (4.21)$$

Медные термопреобразователи сопротивления (ТСМ) применяются для длительного измерения температуры в интервале от -200 до 200 °С. К достоинствам меди как материала для чувствительных элементов следует отнести дешевизну, возможность получения в чистом виде, хорошую технологичность, линейность зависимости сопротивления R_t от температуры t . Статическая характеристика преобразования у ТСМ описывается уравнением

$$R_t = R_0 (1 + \alpha t), \quad (4.22)$$

где α – температурный коэффициент, равный 0,00428 °С⁻¹,

R_0 – сопротивление ТСМ при 0 °С.

Линейность статической характеристики является достоинством меди, а ее недостатком – интенсивная окисляемость, что ограничивает диапазон применения ТСМ температурой 200 °С и требует покрытия изоляцией проволоки чувствительного элемента. Проволока может покрываться либо эмалью, либо кремнийорганической изоляцией.

Полупроводниковые термопреобразователи сопротивления обычно называются термисторами и используются для измерения температур в интервале (-100...300) °С. Их достоинства – высокое значение ТКС (на порядок больше, чем у металлов), малая тепловая инерция и высокое номинальное сопротивление. Недостатками являются нелинейность номинальной статической характеристики, невзаимозаменяемость из-за большого разброса номинального сопротивления и ТКС, нестабильность статической характеристики. В связи с этими недостатками полупроводниковые термопреобразователи обычно используются в цепях температурной компенсации и сигнализации, где не предъявляются высокие требования к точности измерения температуры.

4.6.3 Устройство термометров сопротивления

Термометры сопротивления имеют специальную арматуру, сходную в основном с арматурой термоэлектрических термометров. Арматура состоит из электроизоляции, защитного чехла и головки для присоединения внешних проводов. Арматура изолирует чувствительный элемент (обмотку) термометра, защищает его от вредного действия окружающей среды, обеспечивает необходимую прочность термометра и возможность закрепления его в месте установки.

На рис. 4.10 показано устройство платинового термометра сопротивления типа ТСП-5071, предназначенного для измерения температуры жидкости, газа и пара в диапазоне -260-750° С.

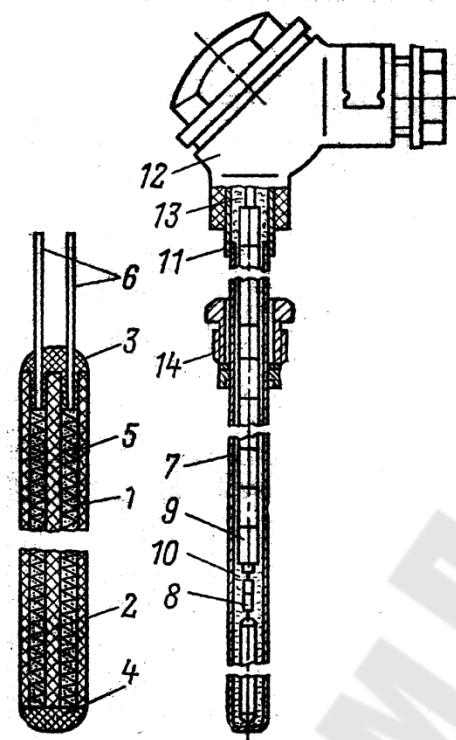


Рис. 4.10 Платиновый термометр сопротивления типа ТСП-5071

Термометр виброустойчивый, выпускается одинарным или двойным, градуировочных характеристик гр. 21 и гр. 22, класса точности К-П.

Чувствительный элемент термометра представляет собой платиновую спираль 1 из тонкой проволоки, помещенную в многоканальную фарфоровую трубку 2 с капиллярными отверстиями. С торцов трубка плотно закрыта пробками 3 и 4. Каналы трубки со спиралью дополнительно заполнены керамическим порошком 5, который одновременно изолирует и поддерживает спираль. К концам спирали припаяны выводные провода 6.

Чувствительный элемент термометра вставлен в защитный чехол 7 наружным диаметром 10 мм, изготовленный из стали 0Х13 или Х18Н10Т. Выводные провода изолированы фарфоровыми бусами 8 и 9. Свободное пространство защитного чехла заполнено окисью алюминия 10. С помощью стальной втулки 11 защитный чехол присоединен к водозащищенной бакелитовой головке 12. В головке выводные провода припаяны к двум винтовым зажимам для подключения внешних проводов и уплотнены герметизирующей мастикой 13. Термометр имеет штуцер 14 для крепления.

4.6.4 Измерительные мосты

Одними из наиболее распространенных средств измерения сопротивления являются **мостовые**. Простейшая схема четырехплечевого моста изображена на рис. 1. Схема содержит резисторы, источник питания $U_{\text{пит}}$ и измерительный прибор (ИП). Точки *a* и *b*, к которым в параллельной цепи подводится

напряжение питания, образуют **диагональ питания**. Точки c и d , с которых напряжение $U_{\text{ВЫХ}}$ снимается на измерительный прибор, образуют **измерительную диагональ**. Точки a, b, c, d называются **вершинами моста**. Резисторы между двумя соседними вершинами – R_1, R_2, R_M, R_x образуют **плечи моста**, R_x – резистор, сопротивление которого нужно измерить. Плечи, не имеющие общих вершин, называются **противолежащими**. В данном случае это резисторы R_1 и R_M, R_2 и R_x . Плечи, имеющие общую вершину, называются **смежными** (прилежащими), т.е. это резисторы R_x и R_2, R_2 и R_M, R_M и R_x, R_x и R_1 . Плечи могут состоять из многих резисторов, включенных различными способами, резисторы могут входить и в диагонали. Плечи моста могут быть образованы не только активными сопротивлениями, но и индуктивными, емкостными или их сочетаниями. Типовой схемой является включение переменного резистора в качестве корректора нуля в одну из вершин моста, например между R_1 и R_2 .

Мосты подразделяются на **уравновешенные** и **неуравновешенные**.

Уравновешенные мосты

Состояние моста, при котором $U_{\text{ВЫХ}} = 0$, называется равновесным состоянием, а мост в таком состоянии называется **уравновешенным**. Этот метод измерения сопротивлений является разновидностью компенсационного (нулевого) метода измерений. Для уравновешивания моста при измерениях R_x используется известное переменное сопротивление. На рис. 4.11 это магазин сопротивлений R_M . При $U_{\text{ВЫХ}} = 0$ и $I_{\text{ИП}} = 0$, через R_x и R_M протекает один и тот же ток, а через R_1, R_2 – ток I_2 , тогда $R_x I_1 = R_1 I_2$ и $R_M I_1 = R_2 I_2$. Разделив эти равенства, получим $R_x / R_M = R_1 / R_2$ или

$$R_x R_2 = R_1 R_M \quad (4.23)$$

т.е. условием равновесия моста является равенство произведений сопротивлений противолежащих плеч моста. Из (4.23) следует, что

$$R_x = R_1 R_M / R_2 \quad (4.24)$$

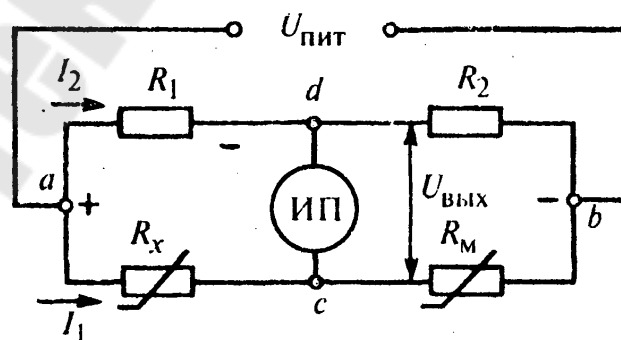


Рис. 4.11 Схема уравновешенного моста

Плечи R_1 , R_2 называют **плечами соотношения**, поскольку они определяют масштаб уравнивающего сопротивления магазина. Уравнение (4.23) определяет положительные стороны измерения сопротивления с помощью уравненного моста:

- независимость результата измерения от напряжения питания;
- линейная зависимость R_x от R_m ;
- измерительный прибор выполняет только функции чувствительного нуль-прибора (далее НП), фиксирующего отклонение напряжения измерительной диагонали от нулевого значения.

При нарушении условия равновесия $R_x R_2 \neq R_1 R_m$ мост становится неуравновешенным, напряжение небаланса $U_{\text{вых}}$ растет с увеличением разности произведений сопротивлений противоположных плеч и ростом напряжения питания моста.

Неуравновешенные мосты

В **неуравновешенных мостах** напряжение измерительной диагонали изменяется с изменением измеряемого сопротивления, и плечи моста не содержат уравнивающих элементов. Неуравновешенные мосты широко используются в различных типах преобразователей неэлектрических величин.

Мост на рис. 4.12 будет неуравновешенным, если три его плеча R_1 , R_2 , R_3 образованы резисторами с постоянным сопротивлением, а в четвертое плечо включен измеряемый резистор R_x (в мостовых измерительных схемах термометров это R_t).

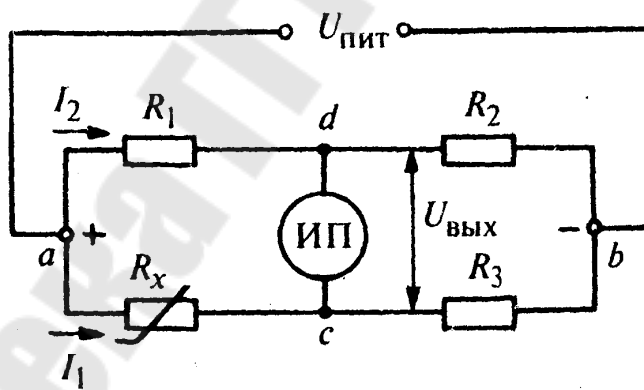


Рис. 4.12 Схема неуравновешенного моста

При постоянном напряжении $U_{\text{пит}}$ с изменением сопротивления R_x изменяется напряжение $U_{\text{вых}}$ в измерительной диагонали. По известной градуировочной характеристике $U_{\text{вых}} = f(R_x)$ можно определить значение R_x . При необходимости шкала измерительного прибора ИП (например, милливольтметра) может быть отградуирована в единицах сопротивления, температуры или другой величины.

На значение выходного напряжения моста $U_{\text{ВЫХ}}$ влияют не только сопротивления плеч, но так же сопротивление диагонали питания (включая внутреннее сопротивление источника) и измерительной диагонали (включая входное сопротивление измерительного прибора). При анализе схемы можно предположить, что внутреннее сопротивление источника питания равно нулю, а входное сопротивление измерительного прибора очень велико и ток в измерительной диагонали близок к нулю. В этом случае $U_{\text{ВЫХ}} = R_x I_1 - R_1 I_2$, поскольку $I_1 = U_{\text{ПИТ}} / (R_x + R_3)$ и $I_2 = U_{\text{ПИТ}} / (R_1 + R_2)$, то получаем следующую зависимость между выходным напряжением $U_{\text{ВЫХ}}$ и измеряемым сопротивлением R_x :

$$U_{\text{ВЫХ}} = U_{\text{ПИТ}} (R_x R_2 - R_1 R_3) \quad (4.25)$$

Из выражения (4.25) видны недостатки неуравновешенного моста:

- нелинейная статическая характеристика $U_{\text{ВЫХ}} = f(R_x)$;
- зависимость $U_{\text{ВЫХ}}$ от напряжения питания $U_{\text{ПИТ}}$, что требует стабилизации $U_{\text{ПИТ}}$;
- погрешность неуравновешенного моста не может быть меньше погрешности прибора, измеряющего $U_{\text{ВЫХ}}$.

Мосты рассчитываются таким образом, чтобы при значении R_x , соответствующем нижнему пределу измерения, выходное напряжение $U_{\text{ВЫХ}}$ было бы равно нулю.

4.6.5 Магнитоэлектрические логометры

Магнитоэлектрический логометр является одним из средств измерения (вторичный промышленный прибор), применяемых в комплекте с техническими термопреобразователями сопротивления для измерения температуры. Принцип действия логометра основан на измерении отношения токов в двух электрических цепях. В одну из них включен термопреобразователь сопротивления, а в другую – резистор с постоянным сопротивлением. На рис. 4.13 представлена схема магнитоэлектрического логометра, состоящего из двух рамок: компенсирующей 1 и рабочей 2, жестко скрепленных друг с другом и со стрелкой 3 и помещенных в воздушном зазоре, между полюсными наконечниками 4 и 5 постоянного магнита и неподвижным сердечником 6 (это условная схема удобна для понимания принципа действия).

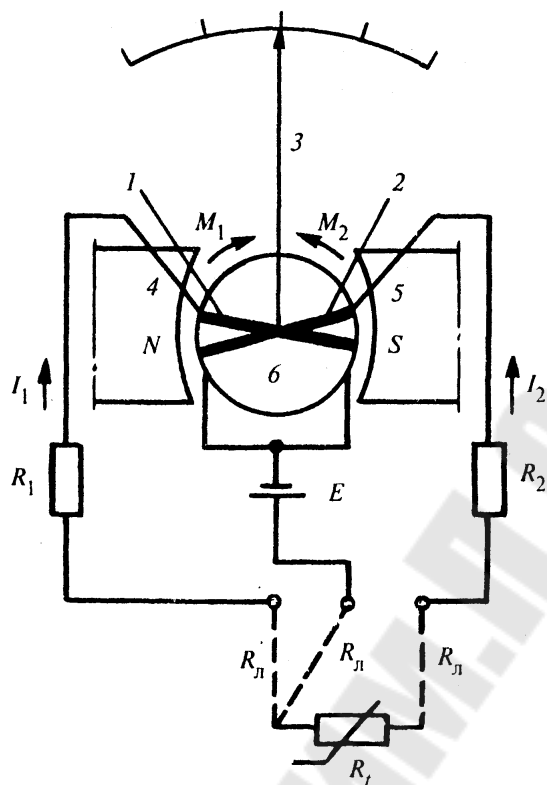


Рис. 4.13 Принципиальная схема магнитоэлектрического логометра:

1,2 – компенсирующая и рабочая рамки; 3 – стрелка; 4, 5 – полюсные наконечники постоянного магнита; 6 – неподвижный сердечник

4.7 Измерение температуры тел по их тепловому излучению

Все рассмотренные средства измерения температуры (термометры расширения, термоэлектрические преобразователи и термопреобразователи сопротивления) предусматривают непосредственный контакт между чувствительным элементом термометра или термопреобразователя и измеряемой средой. Поэтому такие методы называются **контактными**.

Верхний предел применения контактных методов ограничивается значениями до 2200 °С. Однако в ряде случаев в промышленности и при исследованиях возникает необходимость измерять более высокие температуры. Кроме того, часто недопустим непосредственный контакт термометра с измеряемой средой. В этих случаях применяются **бесконтактные** средства измерения температуры, которые измеряют температуру тела или среды по тепловому излучению. Такие средства измерения называются **пирометрами**. Серийно выпускаемые пирометры применяются для измерения температур до 4000 °С.

Бесконтактные методы измерения теоретически не имеют верхнего предела измерения и возможности их использования определяются соответствием спектров излучения измеряемых тел или сред и спектральных характеристик пирометров. Если для каких-либо условий могут быть использованы и контактные

ные и бесконтактные методы измерения, то, как правило, предпочтение следует отдать контактному, так как они позволяют обеспечить более высокую точность измерения.

Все тела излучают электромагнитные волны различной длины λ .

Если излучение какого-либо тела падает на другое тело, то оно может полностью или частично отражаться от поверхности, поглощаться телом, проходить через тело. Тело, поглощающее все падающее на него излучение, называется **абсолютно черным телом**. Отношение спектральной энергетической яркости любого источника теплового излучения $B_{\lambda T}$ к спектральной энергетической яркости абсолютно черного тела $B_{0\lambda T}$ при одной и той же длине волны λ и температуре T называется **спектральным коэффициентом излучения (спектральная степень черноты)**.

$$\varepsilon_{\lambda T} = B_{\lambda T} / B_{0\lambda T} \quad (4.26)$$

Полная (интегральная) энергетическая яркость тела B_T при температуре T может быть определена по спектральной энергетической яркости при интегрировании по всему диапазону длин волн

$$B_{0T} = \int_0^{\infty} B_{0\lambda T} d\lambda \quad (4.27)$$

Отношение полной энергетической яркости B_T любого источника теплового излучения к полной энергетической яркости $B_{0\lambda T}$ абсолютно черного тела при той же температуре называется **полным коэффициентом излучения (интегральной степенью черноты)**:

$$\varepsilon_T = B_T / B_{0T} \quad (4.28)$$

Интенсивность теплового излучения реальных тел зависит от физической природы тела и коэффициента излучения (степени черноты), значение которого определяется температурой и состоянием поверхности. Значение коэффициента излучения изменяется при изменении состояния поверхности и температуры. В силу этого пирометры излучения градуируются по абсолютно черному телу, для которого $\varepsilon_{\lambda T} = \varepsilon_T = 1$. Поэтому при измерении температуры реальных тел, пирометры оценивают некоторую условную температуру. **Действительная температура** тела рассчитывается по пересчетным формулам с использованием значения коэффициента излучения. В современных пирометрах такой пересчет осуществляется автоматически.

По используемому методу измерения пирометры подразделяются на четыре группы:

- монохроматические (квазимонохроматические);
- полного излучения;
- частичного излучения;
- спектрального отношения.

4.7.1 Монохроматические пирометры

Монохроматические пирометры (иногда называют **оптическими** или **визуальными**) воспринимают излучение в столь узком диапазоне длин волн, что оно считается монохроматическим (обычно это излучение красной части спектра с $\lambda = 0,65$ мкм). Этот участок спектра выделяется светофильтром в сочетании с кривой спектральной чувствительности измерения. В этом случае зависимость энергетической яркости тела от температуры описывается **уравнением Планка**:

$$B_{0\lambda T} = \frac{C_1}{\pi} \lambda^{-5} \left[\exp\left(\frac{C_2}{\lambda T}\right) - 1 \right]^{-1}, \quad (4.29)$$

где C_1 , C_2 – первая и вторая физические константы излучения; λ – длина волны, м;
 T – абсолютная температура, К.

Зависимость спектральной плотности излучения $M_{0\lambda T}$ абсолютно черного тела от длины волны λ для различных значений температуры, построенная по закону Планка, представлена на рис.

$$M_{0\lambda T} = B_{0\lambda T} \pi \quad (4.30)$$

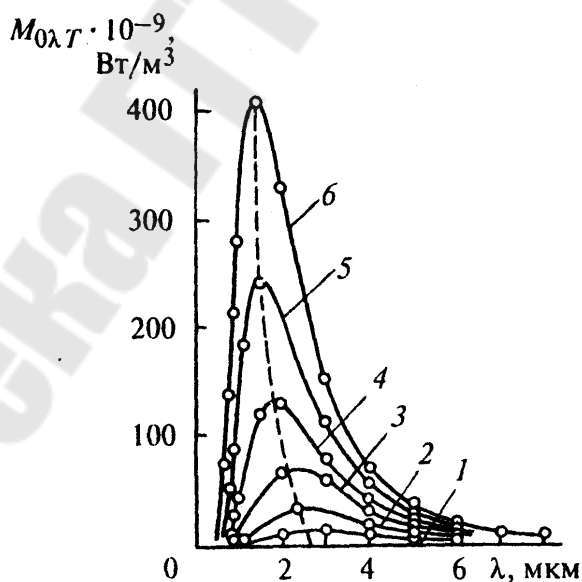


Рис. 4.14 Спектральное распределение плотности излучения для различных значений температуры: 1-6 – $T = 1000$ К; 1200; 1400; 1600; 1800; 2000

В монохроматическом (квазимонохроматическом) пирометре температура тела определяется по спектральной энергетической яркости излучения при определенной длине волны λ и из рис. 4.14 видно, что она увеличивается с ро-

стом температуры. Предположим, что T – действительная температура измеряемого реального нечерного тела. Тогда спектральная энергетическая яркость этого тела будет $B_{\lambda T}$. Так как пирометр градуировался по излучению черного тела, то он покажет температуру абсолютно черного тела T_y , при которой спектральные энергетические яркости реального тела $B_{\lambda T}$ и абсолютно черного тела $B_{0\lambda T_y}$ будут равны. Условная температура T_y называется **яркостной температурой тела**.

Яркостной температурой T_y называется условная температура реального нечерного тела, численно равная такой температуре абсолютно черного тела, при которой спектральные энергетические яркости абсолютно черного тела $B_{0\lambda T_y}$ при температуре T_y и реального тела $B_{\lambda T}$ при температуре T равны.

Одним из современных монохроматических пирометров является **визуальный пирометр с исчезающей нитью накала**. В пирометре использован принцип уравнивания яркости изображения объекта с яркостью пирометрической лампы, находящейся внутри пирометра. Яркость нити изменяется наблюдателем, равенство яркостей воспринимается им как исчезновение нити на фоне контролируемого объекта.

Принципиальная схема квазимонохроматического пирометра с исчезающей нитью представлена на рис. 4.15. Излучение от объекта измерения 1 проходит через объектив 2 и фокусируется в плоскости 3. В этой же плоскости расположена нить пирометрической лампы 4. Изображение объекта измерения и нити пирометрической лампы видны наблюдателю 6 через окуляр 5. Между нитью пирометрической лампы и окуляром располагается красный светофильтр 7. Между объективом и нитью пирометрической лампы может вводиться поглощающее стекло 8. Для изменения накала нити применяется электронный блок 9, который изменяет ток, проходящий через нить пирометрической лампы. Значение тока измеряется цифровым индикатором, отградуированным в значениях яркостной температуры.

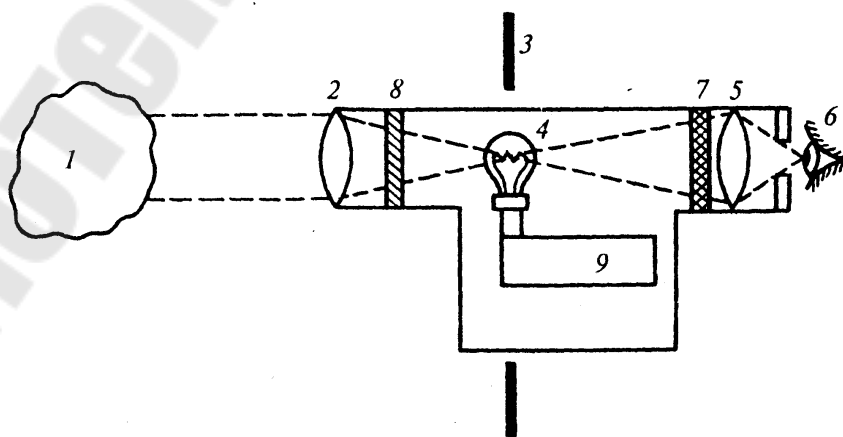


Рис. 4.15 Принципиальная схема квазимонохроматического пирометра с исчезающей нитью накала: 1 – объект измерения; 2 – объектив; 3 – плоскость фокусирования; 4 – пиро-

метрическая лампа; 5 – окуляр; 6 – наблюдатель; 7 – красный светофильтр; 8 – поглощающее стекло; 9 – электронный блок

Квазимонохроматический пирометр предусматривает измерение температуры по спектральной энергетической яркости тела, т.е. по излучению при определенной длине волны.

Процесс измерения сводится к изменению наблюдателем накала нити пирометрической лампы (см. рис. 4.15), а значит, и ее яркости до тех пор, пока глаз наблюдателя не перестанет различать нить пирометрической лампы на фоне объекта измерения (нить «исчезает»). И в этот момент производят отсчет значения температуры.

4.7.2 Пирометры полного и частичного излучения

Пирометры полного излучения (обычно называются **радиационными**) воспринимают излучение в столь широком спектральном интервале, что зависимость интегральной энергетической яркости от температуры с достаточной точностью описывается законом Стефана-Больцмана, связывающим энергию излучения абсолютно черного тела с его температурой. Эту зависимость можно получить, интегрируя функцию Планка по длинам волн от нуля до бесконечности:

$$B_{0T} = \int_0^{\infty} B_{0\lambda T} d\lambda = \int \frac{C_1}{\pi} \lambda^{-5} \left[\exp\left(\frac{C_2}{\pi \lambda T}\right) - 1 \right]^{-1} d\lambda \quad (4.31)$$

В пирометре полного излучения температура тела определяется по интегральной энергетической яркости излучения. Предположим, что действительная температура реального тела равна T . Интегральная энергетическая яркость будет B_T . В связи с тем, что пирометр градуировался по излучению черного тела, при визировании на реальное тело он покажет температуру абсолютно черного тела T_0 , при которой интегральные энергетические яркости реального тела и абсолютно черного тела будут равными,

$$B_T = B_{0T_p} \quad (4.32)$$

Радиационной температурой T_p называется условная температура реального тела, численно равная такой температуре абсолютно черного тела, при которой интегральные энергетические яркости реального и абсолютно черного тела равны.

Принципиальная схема пирометра с термобатареей приведена на рис. 4.16. Излучение от измеряемого тела 1 поступает на объектив (линзу) телескопа 2 и через диафрагму 3 фокусируется на горячих спаях термобатарей 4, заключенной в специальную колбу.

ТермоЭДС батареи поступает на вход вторичного измерительного преобразователя ПВ-0 5. Для визирования первичного преобразователя на объект измерения служит окуляр 6 и диафрагма 7, через которые наблюдатель 8 осуществляет визирование.

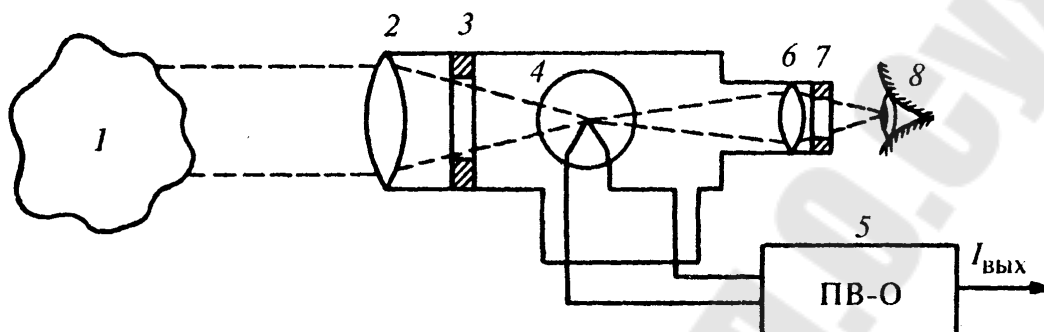


Рис. 4.16 Принципиальная схема пирометра полного излучения с батареями: 1 – объект измерения; 2 – объектив телескопа; 3, 7 – диафрагма; 4 – термобатарея; 5 – вторичный измерительный преобразователь ПВ-0; 6 – окуляр; 8 – наблюдатель

На практике трудно осуществить такой приемник излучения, который поглощал бы излучение всех длин волн от 0 до ∞ . В связи с этим часто применяются пирометры с приемниками, воспринимающими излучение в ограниченном интервале длин волн (более узком, чем у пирометров полного излучения). Пирометр, действие которого основано на зависимости энергетической яркости излучения от температуры в ограниченном интервале длин волн, называется **пирометром частичного излучения**.

4.7.3 Пирометры спектрального отношения

Пирометр, действие которого основано на использовании зависимости от температуры тела отношения спектральной энергетической яркости для двух фиксированных длин волн, называется **пирометром спектрального отношения (цветовым)**.

В пирометре спектрального отношения температура тел определяется по отношению спектральных энергетических яркостей для двух длин волн. Предположим, что действительная температура реального тела T , тогда отношение спектральных энергетических яркостей при длинах волн λ_1 и λ_2 будет $B_{\lambda_1 T} / B_{\lambda_2 T}$. Так как пирометр градуировался по излучению черного тела, то он покажет температуру абсолютно черного тела T_{ψ} , при которой отношение спектральных энергетических яркостей реального тела будут равны:

$$B_{\lambda_1 T} / B_{\lambda_2 T} = B_{0\lambda_1 T_c} / B_{0\lambda_2 T_c} \quad (4.32)$$

Цветовой температурой T_c называется условная температура реального тела численно равная такой температуре абсолютно черного тела, при которой отношение спектральных энергетических яркостей абсолютно черного тела при длинах волн λ_1 и λ_2 равно отношению спектральных яркостей при тех же длинах волн реального тела с температурой T .

Одна из схем пирометра спектрального отношения представлена на рис. 4.17.

Излучение от измеряемого тела 1 поступает в объектив 2 пирометра и затем на фильтр из фосфида индия 3, на котором световой поток частично отражается и через зеркало 4 направляется на кремневый фотоэлемент 5. Под влиянием света на фотоэлементе возникает фотоЭДС. Другая часть светового потока частично пропускается фильтром 3, отражается от внутренней плоскости и через зеркало 6 направляется на фотоэлемент 7, на котором возникает фотоЭДС U_{λ_2} . Эффективная длина волны отраженного фильтром 3 излучения составляет $\lambda_1 = 0,888$ мкм, а длина волны излучения, прошедшего через фильтр 3, $\lambda_2 = 1,034$ мкм.

Выходное напряжение U_{λ_1} фотоэлемента 5 уравнивается частью выходного напряжения фотоэлемента 7 на реохорде 8 компенсатора напряжений. Положение движка реохорда 8 пропорционально отношению $U_{\lambda_2} / U_{\lambda_1}$, т.е. пропорционально отношению спектральных энергетических яркостей $B_{0\lambda_2 T_c} / B_{0\lambda_1 T_c}$, определяемое цветовой температурой T_c измеряемого тела. Если U_{λ_1} , U_{λ_2} не уравновешено на реохорде 8, то на вход усилителя 9 поступает сигнал, вращающий реверсивный двигатель 10, перемещающий движок реохорда 8 до наступления уравновешивания. В цепь фотоэлемента 7 дополнительно подается опорное напряжение к резистору 11 от стабилизатора 12.

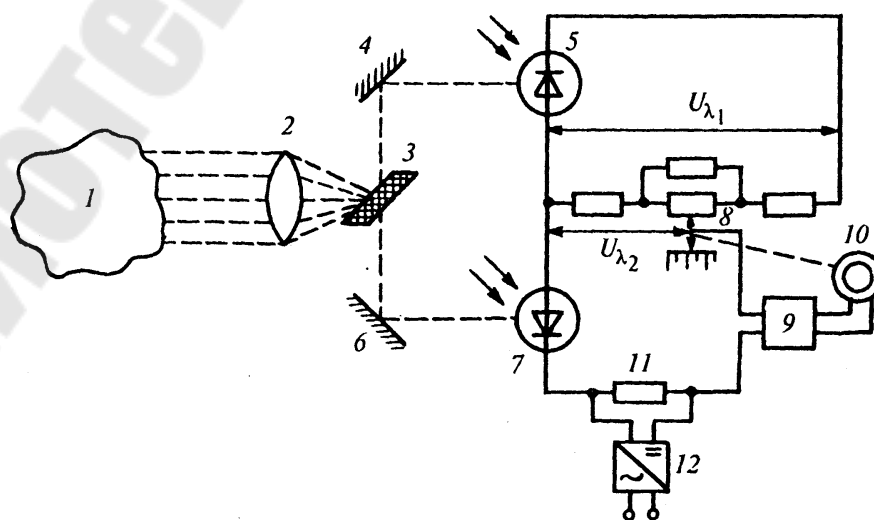


Рис. 4.17 Принципиальная схема пирометра спектрального отношения: 1 – объект измерения; 2 – объектив; 3 – фильтр; 4, 6 – зеркало; 5, 7 – фотоэлементы; 8 – реохорд; 9 – усилитель; 10 – реверсивный двигатель; 11 – резистор; 12 – стабилизатор напряжения

Рассмотрим преимущества и недостатки методов измерения температуры тел по излучению:

- все методы измерения не требуют непосредственного контакта с измеряемой средой, они могут измерять температуру на расстоянии бесконтактным способом и поэтому не искажают температурного поля объекта измерения;

- верхний предел измерения некоторых пирометров излучения не ограничен;

- все методы очень чувствительны.

Однако все методы при измерении температуры реальных тел дают значения условной температуры (яркостной, цветовой, радиационной), а не действительной температуры тела. В общем случае наименьшее отклонение от действительной имеет цветовая температура, а наибольшее – радиационная.

ГЛАВА 5 ИЗМЕРЕНИЕ ДАВЛЕНИЯ И РАЗРЕЖЕНИЯ

5.1 Единицы и методы измерений. Приборы измерения давления и разрежения (классификация)

Давление относится к числу распространенных измеряемых физических величин. Контроль за протеканием большинства технологических процессов в тепловой и атомной энергетике, металлургии, химии связан с измерением давления или разности давлений газовых и жидких сред.

Давление – широкое понятие, характеризующее нормально распределенную силу, действующую со стороны одного тела на единицу поверхности другого. Если действующая среда – жидкость или газ, то давление, характеризующая внутреннюю энергию среды, является одним из основных параметров состояния. Единица измерения давления в системе СИ – Паскаль (Па), равный давлению, создаваемому силой в один ньютон, действующей на площадь в один квадратный метр (Н/м^2). Широко применяются кратные единицы кПа и МПа. Допускается использование таких единиц, как килограмм-сила на квадратный сантиметр (кгс/см^2) и квадратный метр (кгс/м^2), последняя численно равна миллиметру водяного столба (мм вод. ст.). В табл. 5.1 приведены перечисленные единицы давления и соотношения между ними.

Воспроизведение единицы измерения давления с наивысшей точностью в области избыточных давлений $10^6 \dots 2,5 \cdot 10^8$ Па осуществляется первичным эталоном, включающим грузопоршневые манометры, специальный набор мер массы и установку для поддержания давления. Для воспроизведения единицы давления вне указанного диапазона от 10^{-8} до $4 \cdot 10^5$ Па и от 10^9 до $4 \cdot 10^9$, а также разности давлений до $4 \cdot 10^4$ Па используются специальные эталоны.

Таблица 5.1

Единицы измерения давления

Единицы изме-	Па	Бар	кгс/см ²	кгс/м ² (мм вод. ст.)	мм рт. ст.
1 Па	1	10^{-5}	$1,0197 \cdot 10^{-5}$	0,10197	$7,5006 \cdot 10^{-3}$
1 Бар	10^5	1	1,0197	$1,0197 \cdot 10^4$	750,06
1 кгс/см ²	$9,8066 \cdot 10^4$	0,98066	1	10^4	735,56
1 кгс/м ² (мм вод. ст.)	9,8066	$0,98066 \cdot 10^{-4}$	10^{-4}	1	$7,3556 \cdot 10^{-2}$
1 мм рт. ст.	133,32	$1,3332 \cdot 10^{-3}$	$1,3595 \cdot 10^{-3}$	13,595	1

При измерениях различают **абсолютное**, **избыточное** и **вакуумметрическое** давление. Под абсолютным давлением P , понимают полное давление,

которое равно сумме атмосферного давления $p_{ат}$ и избыточного $p_{и}$:

$$p_a = p_u + p_{ат} \quad (5.1)$$

Понятие вакуумметрического давления вводится при измерении давления ниже атмосферного:

$$p_v = p_{ат} - p_a \quad (5.2)$$

Средства измерения, предназначенные для измерения давления и разности давлений, называются **манометрами**. Последние подразделяются на **барометры, манометры избыточного давления, вакуумметры и манометры абсолютного давления** в зависимости от измеряемого ими соответственно атмосферного, избыточного, вакуумметрического и абсолютного давлений. Манометры, предназначенные для измерения давления или разрежения в диапазоне до 40 кПа (0,4 кгс/см²), называются напоромерами и тягомерами. Тягонапоромеры имеют двустороннюю шкалу с пределами измерения до ± 20 кПа ($\pm 0,2$ кгс/см²). **Дифференциальные манометры** применяются для измерения разности давлений. В зависимости от принципа, используемого для преобразования силового воздействия давления на чувствительный элемент в показания или пропорциональные изменения другой физической величины, средства измерения давления разделяются на **жидкостные, деформационные, электрические, ионизационные, тепловые и грузопоршневые**.

Устройство перечисленных приборов давления разнообразно. Среди них можно выделить пять основных групп измерительных приборов и преобразователей, выпускаемых отечественной промышленностью: **механические, с дифференциально-трансформаторными преобразователями, с компенсацией магнитных потоков, с силовой компенсацией и с тензопреобразователями**.

Манометры и дифманометры выпускаются многими заводами в РФ и СНГ, это концерн «Метран» (г. Челябинск), завод «Манометр», «Манометр-сервис», ВНИИА (г. Москва), «Манотомь» (г. Томск), «Орлэкс» (г. Орел), «Теплоконтроль» (г. Казань), «Теплоприбор» (г. Рязань), «Усть-Каменогорский завод пневмоавтоматики» (г. Усть-Каменогорск), НИИФИ (г. Пенза), «Саранский приборостроительный завод» (г. Саранск), ПК' «Альтернатива» (г. Шатки Новгородской обл.), «Голынковский завод специзделий» (г. Голынковск Новгородской области), «Промприбор» (г. Ивано-Франковск) и др. Манометры выпускают все крупнейшие фирмы, работающие в области создания промышленных систем управления и технических средств автоматизации, такие как Siemens, Rosemount, Foxboro, Honeywell, Yokogawa и др.

5.2 Жидкостные манометры и дифманометры

В жидкостных манометрах измеряемое давление или разность давлений уравнивается гидростатическим давлением столба жидкости. В приборах

используется принцип сообщающихся сосудов, в которых уровни рабочей жидкости совпадают при равенстве давлений над ними, а при неравенстве занимают такое положение, когда избыточное давление в одном из сосудов уравновешивается гидростатическим давлением избыточного столба жидкости в другом. Большинство жидкостных манометров имеют видимый уровень рабочей жидкости, по положению которого определяется значение измеряемого давления. Эти приборы используются в лабораторной практике и в некоторых отраслях промышленности.

Существует группа жидкостных дифманометров, в которых уровень рабочей жидкости непосредственно не наблюдается. Изменение последнего вызывает перемещение поплавка или изменение характеристик другого устройства, обеспечивающих либо непосредственное показание измеряемой величины с помощью отсчетного устройства, либо преобразование и передачу ее значения на расстояние

5.2.1 Двухтрубные жидкостные манометры

Для измерения давления и разности давлений используют двухтрубные манометры и дифманометры с видимым уровнем, часто называемыми *U*-образными. Принципиальная схема такого манометра представлена на рис. 5.1.

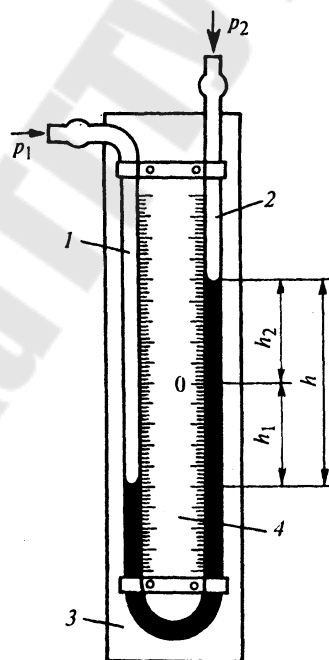


Рис. 5.1 Схема двухтрубного манометра: 1, 2 – вертикальные сообщающиеся стеклянные трубки; 3 – основание; 4 – шкальная пластинка

Две вертикальные сообщающиеся стеклянные трубки 1, 2 закреплены на металлическом или деревянном основании 3, к которому прикреплена шкальная пластинка 4. Трубки заполняются рабочей жидкостью до нулевой отметки. В трубку 1 подается измеряемое давление, трубка 2 сообщается с атмосферой.

При измерении разности давлений к обеим трубкам подводятся измеряемые давления.

Столб жидкости высотой h , м, уравнивает разность давлений в Па:

$$p_1 - p_2 = \rho g h ; \quad h = \frac{1}{\rho g} (p_1 - p_2) , \quad (5.3)$$

где ρ – плотность рабочей жидкости, кг/м³; g – местное ускорение свободного падения, м/с²

В качестве рабочей жидкости используются вода, ртуть, спирт, трансформаторное масло. Таким образом, в жидкостных манометрах функции чувствительного элемента, воспринимающего изменения измеряемой величины, выполняет рабочая жидкость, выходной величиной является разность уровней, входной – давление или разность давлений.

Двухтрубные манометры с водяным заполнением применяются для измерения давления, разрежения, разности давлений воздуха и неагрессивных газов в диапазоне до ± 10 кПа. Заполнение манометра ртутью измерения расширяет пределы до 0,1 МПа, при этом измеряемой средой может быть вода, неагрессивные жидкости и газы.

5.2.2 Однотрубные манометры

Для повышения точности отсчета разности высот уровней используются **однотрубные (чашечные)** манометры (см. рис. 5.2).

У однотрубного манометра одна трубка заменена широким сосудом, в который подается большее из измеряемых давлений. Трубка, прикрепленная к шкальной пластинке, является измерительной и сообщается с атмосферой, при измерении разности давлений к ней подводится меньшее из давлений. Рабочая жидкость заливается в манометр до нулевой отметки.

Под действием давления часть рабочей жидкости из широкого сосуда перетекает в измерительную трубку. Поскольку объем жидкости, вытесненный из широкого сосуда, равен объему жидкости, поступившему в измерительную трубку,

$$h_1 F = h_2 f , \quad h_1 = h_2 f / F , \quad (5.4)$$

где f , F – площади поперечного сечения измерительной трубки и широкого сосуда.

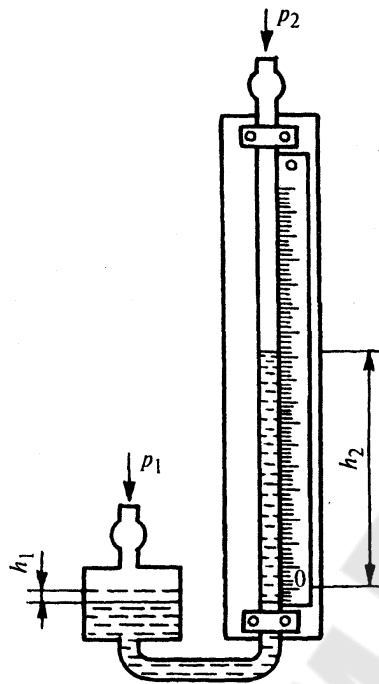


Рис. 5.2 Схема однотрубного манометра

При $f \ll Fh_1 \ll h_2$, и если $F/f \geq 400$, то при измерениях учитывают только изменение уровня в измерительной трубке, а изменением уровня в широком сосуде пренебрегают. Если для повышения точности измерения необходимо учесть это изменение, то шкала градуируется в единицах давления в соответствии с уравнением

$$p_1 - p_2 = \rho g(h_1 - h_2) = \rho g h_2 (f / F + 1) \quad (5.5)$$

Измерение в однотрубных манометрах высоты только одного столба рабочей жидкости приводит к снижению погрешности считывания, которая с учетом погрешности градуировки шкалы не превышает ± 1 мм при цене деления 1 мм. Другие составляющие погрешности, обусловленные отклонениями от расчетного значения ускорения свободного падения, плотности рабочей жидкости и среды над нею, температурными расширениями элементов прибора, являются общими для всех жидкостных манометров.

У двухтрубных и однотрубных манометров основной погрешностью является погрешность считывания разности уровней. При одной и той же абсолютной погрешности приведенная погрешность измерения давления снижается при увеличении верхнего предела измерения манометров. Минимальный диапазон измерения однотрубных манометров с водяным заполнением составляет 1,6 кПа (160 мм вод. ст.), при этом приведенная погрешность измерения не превышает ± 1 %. Конструктивное выполнение манометров зависит от статического давления, на которое они рассчитаны.

5.2.3 Микроманометры

Для измерения давления и разности давлений до 3 кПа (300 кгс/м²) используются микроманометры, которые являются разновидностью однострубных манометров и снабжены специальными приспособлениями либо для уменьшения цены деления шкалы, либо для повышения точности считывания высоты уровня за счет использования оптических или других устройств. Наиболее распространенные лабораторные микроманометры – это микроманометры типа ММН с наклонной измерительной трубкой (рис. 5.3).

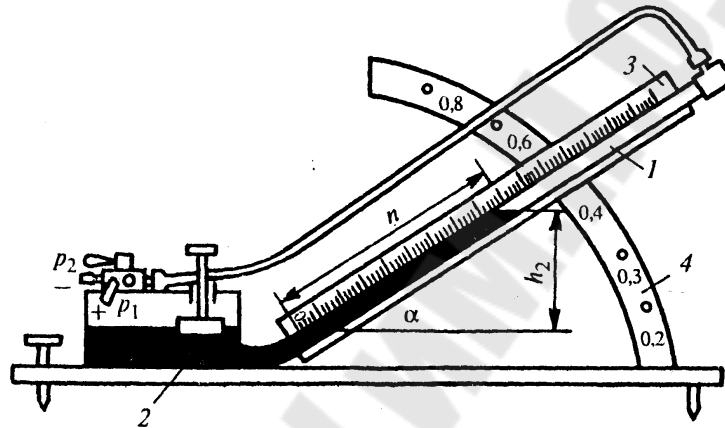


Рис. 5.3 Схема микроманометра ММН: 1 – измерительная трубка; 2 – сосуд; 3 - кронштейн; 4 - сектор

Показания микроманометра определяются по длине столбика рабочей жидкости n в измерительной трубке 1, имеющей угол наклона α . Исходя из равенства объемов рабочей жидкости, вытесненной из широкого сосуда 2 в измерительную трубку 1, получаем

$$h_1 F = n f, h_1 = n f / F, \quad (5.6)$$

где h_1 – изменение уровня в широком сосуде;

f , F – площади поперечного сечения широкого сосуда и трубки. Поскольку $h_2 = n \sin \alpha$,

$$p_2 - p_1 = \rho g (h_1 - h_2) = \rho g n (f / F + \sin \alpha) \quad (5.7)$$

На рис. 5.3 кронштейн 3 с измерительной трубкой 1 крепится на секторе 4 в одном из пяти фиксированных положений, которым соответствуют $k = 0,2; 0,3; 0,4; 0,6; 0,8$ и пять диапазонов измерения прибора от 0,6 кПа (60 кгс/м²) до 2,4 кПа (240 кгс/м²). Приведенная погрешность измерений не превышает 0,5 %. Минимальная цена деления при $k = 0,2$ составляет 2 Па (0,2 кгс/м²), дальнейшее снижение цены деления, связанное с уменьшением угла наклона измерительной трубки, ограничено снижением точности считывания положения уровня рабочей жидкости из-за растягивания мениска.

Более точными приборами являются микроманометры типа ММ, называемые компенсационными. Погрешность считывания высоты уровня в этих приборах не превышает $\pm 0,05$ мм в результате использования оптической системы для установления начального уровня и микрометрического винта для измерения высоты столба рабочей жидкости, уравнивающего измеряемое давление или разность давлений.

5.2.4 Барометры

Барометры применяются для измерения атмосферного давления. Наиболее распространенными являются чашечные барометры с ртутным заполнением, отградуированные в мм рт. ст. (рис. 5.4). Погрешность считывания высоты столба не превышает 0,1 мм, что достигается использованием нониуса 1, совмещаемого с верхней частью мениска ртути. При более измерении атмосферного давления необходимо вводить поправки на отклонение ускорения свободного падения от нормального и значение температуры барометра, измеряемой термометром 2. При диаметре трубки менее 10 мм учитывается капиллярная депрессия, обусловленная поверхностным натяжением ртути.

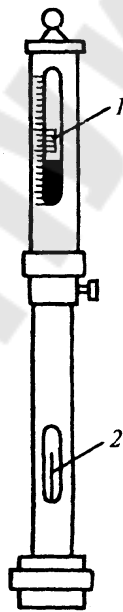


Рис. 5.4 Схема чашечного ртутного барометра: 1 – нониус; 2 – термометр

5.2.5 Компрессионные манометры

Компрессионные манометры (манометры Мак-Леода), схема которых представлена на рис. 5.5, содержат резервуар 1 с ртутью и погруженной в нее трубкой 2. Последняя сообщается с измерительным баллоном 3 и трубкой 5. Баллон 3 заканчивается глухим измерительным капилляром 4, к трубке 5 подключен капилляр сравнения 6. Оба капилляра имеют одинаковые диаметры, чтобы на результатах измерения не сказывалось влияние капиллярных сил.

Давление в резервуар 1 подается через трехходовой кран 7, который в процессе измерения может находиться в положениях, указанных на схеме.

Принцип действия манометра основан на использовании закона Бойля-Мариотта, согласно которому для фиксированной массы газа произведение объема на давление при неизменной температуре представляет постоянную величину. При измерении давления выполняются следующие операции. При установке крана 7 в положение а измеряемое давление подается в резервуар 1, трубку 5, капилляр 6, и ртуть сливается в резервуар. Затем кран 7 плавно переводится в положение с. Поскольку атмосферное давление значительно превышает измеряемое p , ртуть вытесняется в трубку 2. При достижении ртути устья баллона 8, отмеченного на схеме точкой О, от измеряемой среды отсекается объем газа V , находящийся в баллоне и измерительном капилляре 4. Дальнейшее повышение уровня ртути сжимает отсеченный объем. При достижении ртути в измерительном капилляре высоты h_u выпуск воздуха в резервуар 1 прекращается и кран 7 устанавливается в положение b . Изображенное на схеме положение крана 7 и ртути соответствует моменту снятия показаний манометра.

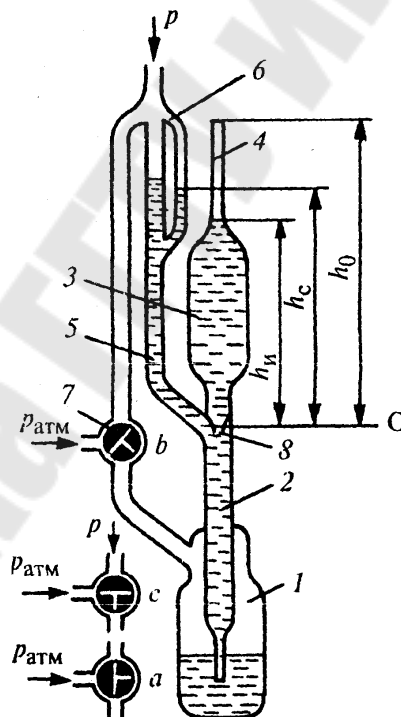


Рис. 5.5 Схема компрессионного манометра: 1 – резервуар; 2, 5 – трубки; 3 – измерительный баллон; 4 – глухой измерительный капилляр; 6 – капилляр сравнения; 7 – трехходовой кран; 8 – устье баллона

Нижний предел измерения компрессионных манометров составляет 10^{-3} Па (10^{-5} мм рт. ст.), погрешность не превышает $\pm 1\%$. Нижний предел измерения манометра в основном ограничен погрешностью определения объема газа

после сжатия, зависящей от точности изготовления капиллярных трубок.

Набор компрессионных манометров совместно с мембранно-емкостным манометром входит в состав государственного специального эталона единицы давления в области $10^{-3} \dots 10^3$ Па.

Достоинствами рассмотренных жидкостных манометров и дифманометров являются их простота и надежность при высокой точности измерений. При работе с жидкостными приборами необходимо исключать возможность перегрузок и резких изменений давления, так как в этом случае может происходить выплескивание рабочей жидкости в линию или атмосферу.

5.2.6 Установка, поверка и поправки к показаниям жидкостных манометров

На точность измерения давления при помощи жидкостных манометров оказывают влияние правильность установки прибора, отсчета высоты столба и определения плотности уравнивающей жидкости.

Во избежание искажения результатов измерений жидкостные манометры закрепляются вертикально в местах, не подверженных вибрации и нагреву. Если манометр установлен выше или ниже места отбора давления, а соединительная линия и пространство над жидкостью заполнено другой, более легкой жидкостью (например, водой при измерении ртутным манометром давления воды или пара), необходимо к показаниям прибора вводить поправку, учитывающую давление, оказываемое столбом этой жидкости (выше +, ниже -).

Жидкостные манометры при исправном их состоянии и правильной установке обеспечивают достаточно высокую точность измерения, почти не зависящую от времени работы, и поэтому не требуют поверки.

5.3 Деформационные манометры и дифманометры

В деформационных манометрах используется зависимость деформации чувствительного элемента или развиваемой им силы от измеряемого давления. Пропорциональная давлению деформация или сила преобразуются в показания или соответствующие изменения выходного сигнала. Большинство деформационных манометров и дифманометров содержат упругие чувствительные элементы, осуществляющие преобразование давления в пропорциональное перемещение рабочей точки.

Наиболее распространенные упругие чувствительные элементы представлены на рис. 5.6. К их числу относятся трубчатые пружины, сильфоны, плоские и гофрированные мембраны, мембранные коробки, вялые мембраны с жестким центром.

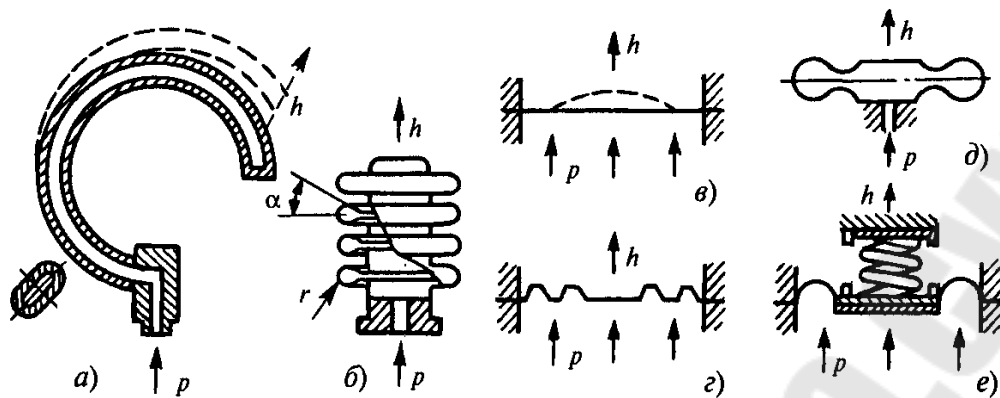


Рис. 5.6 Упругие чувствительные элементы:

a – трубчатые пружины; *б* – сильфоны; *в, з* – плоские и гофрированные мембраны; *д* – мембранные коробки; *е* – вмятые мембраны с жестким центром

Полые одновитковые трубчатые пружины (см. рис. 5.6, *a*), имеют эллиптическое или плоскоовальное сечение. Один конец пружины, в который поступает измеряемое давление, закреплен неподвижно в держателе, второй (закрытый) – может перемещаться. Под действием разности измеряемого внутреннего давления и внешнего атмосферного трубчатая пружина деформируется: малая ось сечения трубки увеличивается, большая уменьшается, при этом пружина раскручивается и ее свободный конец совершает перемещение в 1...3 мм. Для давлений до 5 МПа трубчатые пружины изготавливают из латуни, бронзы, а для более высоких давлений – из легированных сталей и сплавов никеля.

Сильфонные и мембранные чувствительные элементы имеют более широкие возможности для увеличения эффективной площади с целью получения требуемого перестановочного усилия, что позволяет использовать их для измерения малых избыточных давлений и разрежения. **Сильфон** (см. рис. 5.6, *б*) – это тонкостенная трубка с поперечными кольцевыми гофрами на боковой стенке. Жесткость сильфона зависит от материала, наружного и внутреннего диаметров, толщины стенки заготовки, радиуса закругления гофр r и угла их уплотнения α , числа гофр. Сильфоны бывают цельнотянутыми и сварными. Благодаря значительному прогрессу в технологии изготовления сильфонов, они получили широкое распространение в манометрах и дифманометрах с силовой компенсацией.

Наиболее разнообразными по конструкции являются **мембранные чувствительные элементы**. Представленная на рис. 5.6, *в*, **плоская** или **пластинчатая мембрана** представляет собой гибкую тонкую пластину, закрепленную по окружности. Под влиянием разности давлений, действующих с обеих сторон на мембрану, ее центр перемещается. Плоская мембрана имеет нелинейную упругую характеристику и малые перемещения рабочей точки, в связи с чем ее в основном применяют для преобразования давления в силу (пьезоэлектриче-

ские преобразователи), поверхностные деформации (тензопреобразователи) и малые перемещения (емкостные и резонансные преобразователи).

Для улучшения статической характеристики используют **гофрированные мембраны** и **мембранные коробки** (см. рис. 5.6, з, д). Профили мембран могут быть **пильчатыми, трапецеидальными, синусоидальными**. Гофрирование мембраны приводит к увеличению ее жесткости, спрямлению статической характеристики и увеличению зоны пропорциональных перемещений рабочей точки. Более широко используются мембранные коробки, которые представляют собой сваренные или спаянные по внешней кромке мембраны. Жесткость коробки вдвое ниже жесткости каждой из мембран. В дифманометрах, чувствительных элементах регуляторов прямого действия используются мембранные блоки, включающие две коробки и более.

Для измерения малых давлений применяются **вялые мембраны** (см. рис. 5.6, е), изготовленные из бензomasлостойкой прорезиненной ткани. В центре мембраны крепятся металлические пластины, в одну из которых упирается винтовая пружина, выполняющая функции упругого элемента.

В соответствии с используемым в приборах типом рассмотренных чувствительных элементов деформационные манометры подразделяются на **пружинные, сильфонные и мембранные**.

5.3.1 Пружинные манометры

Большинство показывающих, самопишущих и сигнализирующих манометров с трубчатой пружиной являются устройствами прямого преобразования, в которых давление последовательно преобразуется в перемещение чувствительного элемента и связанного с ним механически показывающего, регистрирующего или контактного устройства.

Схема показывающего пружинного манометра представлена на рис.5.7.

Одновитковая трубчатая пружина 1 с одного конца приварена к держателю 2, прикрепленному к корпусу манометра. Нижняя часть держателя заканчивается шестигранной головкой и штуцером, с помощью которого к манометру подсоединяется трубка, подводящая давление. Свободный конец пружины 1 припаян к пробке 3, шарнирно соединенной с поводком 4.

При перемещении свободного конца пружины поводок поворачивает зубчатый сектор 5 относительно оси О, вызывая поворот шестерни (трибки) 6 и сидящей на одной оси с ней показывающей стрелки 7. Пружина, не приведенная на рисунке, обеспечивает поджатие зубцов трибки к зубцам сектора, убирая люфт. Статическая характеристика манометра может подстраиваться за счет изменения точки закрепления поводка 4 в прорези сектора 5 и смещения положения стрелки, устраняя мультипликативную и аддитивную погрешности. На рис. 10.7 показано радиальное размещение штуцера. Манометры также изготавливаются с его осевым размещением.

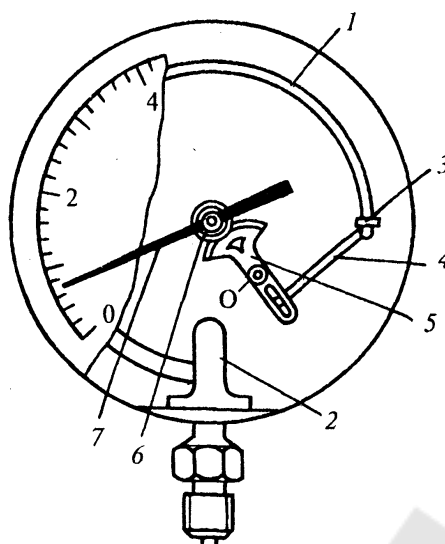


Рис. 5.7 Пружинный показывающий манометр

1 – одновитковая трубчатая пружина; 2 – держатель; 3 – пробка; 4 – поводок; 5 – зубчатый сектор; 6 – шестерня; 7 – стрелка

Пружинные показывающие манометры выпускаются с верхним пределом измерения от 0,1 МПа (1 кгс/см²) до 10³ МПа (10⁴ кгс/см²) в соответствии со стандартным рядом. Пружинные вакуумметры имеют диапазон измерения – 0,1...0 МПа, а мановакуумметры при нижнем пределе измерения – 0,1 МПа имеют верхний предел измерения по избыточному давлению от 0,1 до 2,4 МПа. Образцовые показывающие пружинные манометры имеют класс точности 0,15; 0,25 и 0,4; рабочие 1,5; 2,5; 4, рабочие повышенной точности 0,6 и 1.

5.3.2 Сильфонные манометры

Сильфонные чувствительные элементы используются в механических показывающих и самопишущих дифманометрах типа ДСП и ДСС. Схема их чувствительного элемента, представляющего сильфонный блок, дана на рис. 5.8а, на рис. 5.8б приведен внешний вид дифманометра с вентильным блоком. Под действием разности давлений рабочий сильфон 1, расположенный в плюсовой камере дифманометра, сжимается и кремнийорганическая жидкость 2, заполняющая внутреннюю полость сильфона 1, частично вытесняется во внутреннюю полость сильфона 3, находящегося в минусовой камере дифманометра. При этом перемещается шток 4, жестко соединенный с дном сильфона 3. Работавшие на растяжение пружины 5 одним концом прикреплены к неподвижному стакану 6, а другим – к концу штока 4. Со штоком 4 соединен конец рычага 7, который с помощью торсиона 8, отделяющего внутреннюю полость дифманометра от атмосферы, поворачивает ось 9, связанную с записывающим или показывающим устройством. Резиновые кольца 10 служат для ограничения хода штока 4 при односторонних перегрузках.

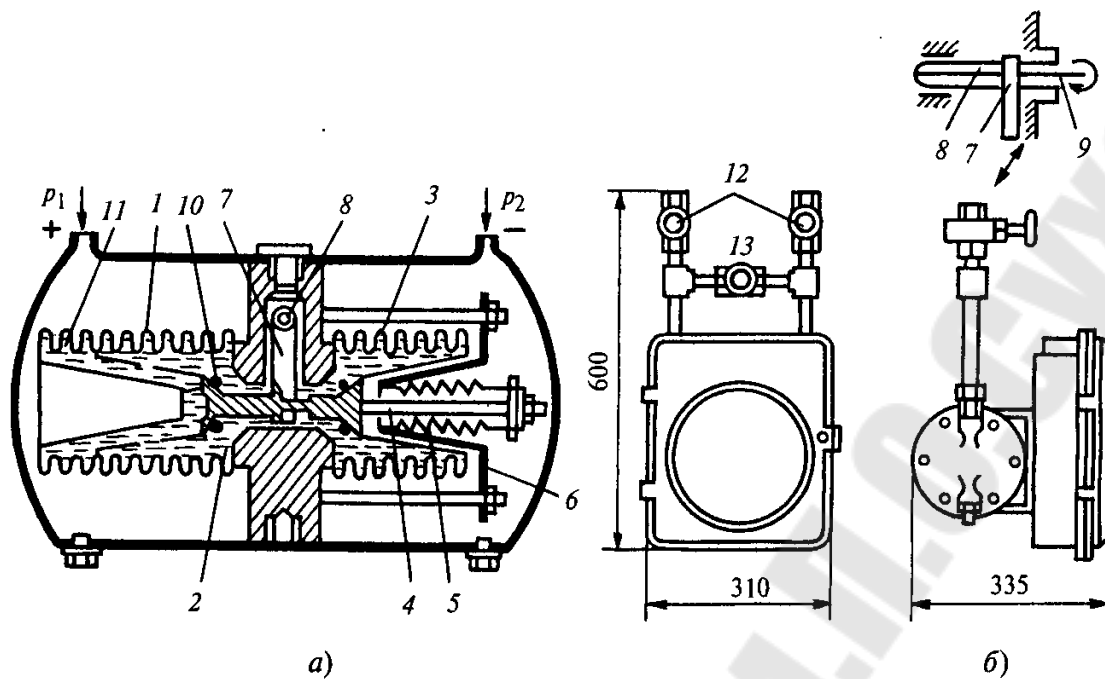


Рис. 5.8. Сифонный дифманометр типа ДС:

a – схема сифонного блока; *б* – внешний вид; 1 – рабочий сифон; 2 – кремний органическая жидкость; 3 – внутренняя полость сиффона; 4 – шток; 5 – пружины; 6 – неподвижный стакан; 7 – рычаг; 8 – торсион; 9 – ось; 10 – резиновые кольца; 11 – гофры; 12, 13 – вентили запорные и уравнивательный

Первые три гофра 11 представляют собой термокомпенсатор, воспринимающий изменение внутреннего объема жидкости 2 при изменении температуры прибора. Дифманометры снабжаются вентиляльным блоком, включающим запорные вентили 12 и уравнивательный 13. Подключение к объекту измерения дифманометра с открытым уравнивательным вентиляем позволяет исключить воздействие одностороннего рабочего давления на чувствительный элемент. При закрытых вентилях 12 и открытом 13 указатель дифманометра должен находиться на начальной отметке, что используется при проверке его работоспособности и настройке.

5.3.3 Мембранные манометры

Мембранные упругие чувствительные элементы, чаще в виде мембранных коробок, используются в приборах для измерения напора и разрежения. Схема профильного напоромера типа НМП и его внешний вид представлены на рис. 5.9.

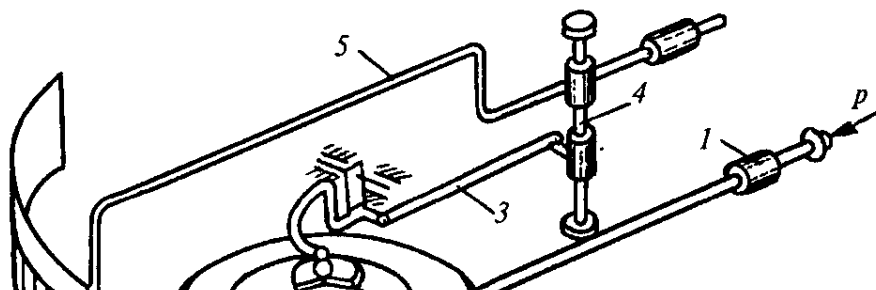


Рис. 5.9. Схема и внешний вид профильного мембранного напоромера НМП:
1 – штуцер; 2 – мембранная коробка; 3 – система рычагов и тяг; 4 – ось; 5 – показывающая стрелка; 6 – профильная шкала; 7 – корректор

Измеряемое давление через штуцер 1 на задней стенке прибора подается во внутреннюю полость мембранной коробки 2. С помощью системы рычагов и тяг 3, изображенных на схеме упрощенно, перемещение центра мембранной коробки преобразуется в пропорциональный угол поворота оси 4, на которую насажена показывающая стрелка 5, перемещающаяся вдоль профильной шкалы 6. Для настройки начального положения показывающей стрелки используется корректор 7, находящийся на лицевой панели. Эти приборы выпускаются так же, как тягомеры и тягонапоромеры. Диапазон измерения приборов достигает 25 кПа в соответствии со стандартным рядом при классе точности 1,5; 2,5.

5.3.4 Установка, поверка и поправки к показаниям деформационных манометров

Деформационные манометры должны устанавливаться в местах, не подверженных вибрации и сотрясению, вредно отражающемся на работе и состоянии приборов. Нормальное (рабочее) положение показывающего манометра – штуцером вниз (при радиальном штуцере) или вбок (при осевом штуцере). Самопишущие – строго вертикально.

В зависимости от требуемой точности измерения к показаниям деформационных манометров вводятся в общем случае следующие поправки:

- 1) основная (определяется по свидетельству манометра);
- 2) дополнительная (определяется, исходя из условий измерения):

- на расположение манометра относительно места отбора давления (если соединительная линия заполнена жидкостью);
- на температуру прибора.

Деформационные манометры нуждаются в периодической поверке, а при возрастании основной погрешности – и в переградуировке шкалы. Чувстви-

тельный элемент этих приборов постепенно теряет свои упругие свойства из-за появления остаточных деформаций. Одновременно на точность показываний оказывает влияние износ передаточного механизма прибора.

5.3.5 Электрические и прочие манометры

Пьезоэлектрические манометры. Принцип действия манометров этого типа основан на пьезоэлектрическом эффекте, сущность которого состоит в возникновении электрических зарядов на поверхности сжатой кварцевой пластины, которая вырезается перпендикулярно электрической оси кристаллов кварца. Схема пьезоэлектрического манометра представлена на рис. 5.10. Измеряемое давление с помощью мембраны 1 преобразуется в усилие, сжимающее кварцевые пластины 2. Электрический заряд, возникающий на металлизированных плоскостях 3 под действием усилия F со стороны мембраны, определяется выражением:

$$Q = kF = kSp, \quad (5.8)$$

где p – давление, действующее на металлическую мембрану 1 с эффективной площадью S ;

k – пьезоэлектрическая постоянная, Кл/Н.

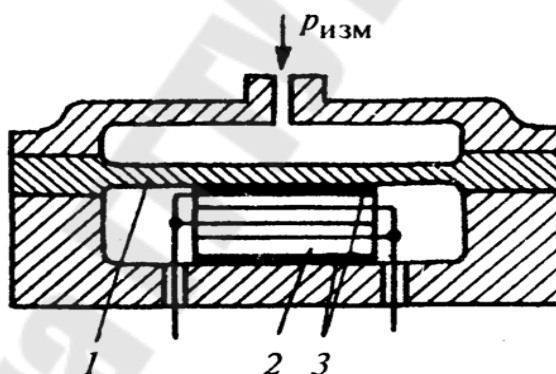


Рис. 5.10 Схема пьезоэлектрического манометра:
1 – мембрана; 2 – кварцевые пластины; 3 – металлизированные плоскости

Манометры с емкостными преобразователями

Высокими метрологическими характеристиками обладают интеллектуальные манометры с емкостными преобразователями, выпускаемыми фирмами Fischer-Rosemount, Philips и др. Схема микропроцессорного преобразователя давления модели 1151 (фирма Fischer-Rosemount) представлена на рис. 5.11. Измеряемое давление или разность давлений воздействуют на разделительные мембраны 1, между которыми в полости, заполненной нейтральной жидкостью, находится чувствительная мембрана 2, являющаяся подвижной обкладкой дифференциальных конденсаторов, неподвижными обкладками которых служат стенки камер 3, 4.

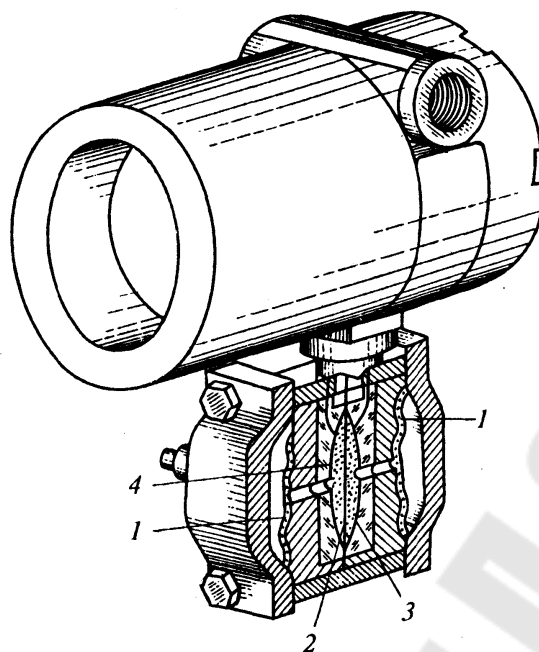


Рис. 5.11 Манометр с емкостным преобразователем:
1 – разделительные мембраны; 2 – чувствительная мембрана; 3, 4 – неподвижные обкладки конденсаторов

Ионизационные манометры. Для измерения давления в диапазоне $10^{-1} \dots 10^{-8}$ Па ($10^{-3} \dots 10^{-10}$ мм рт. ст.) используются ионизационные манометры. Схема прибора представлена на рис. 5.12а.

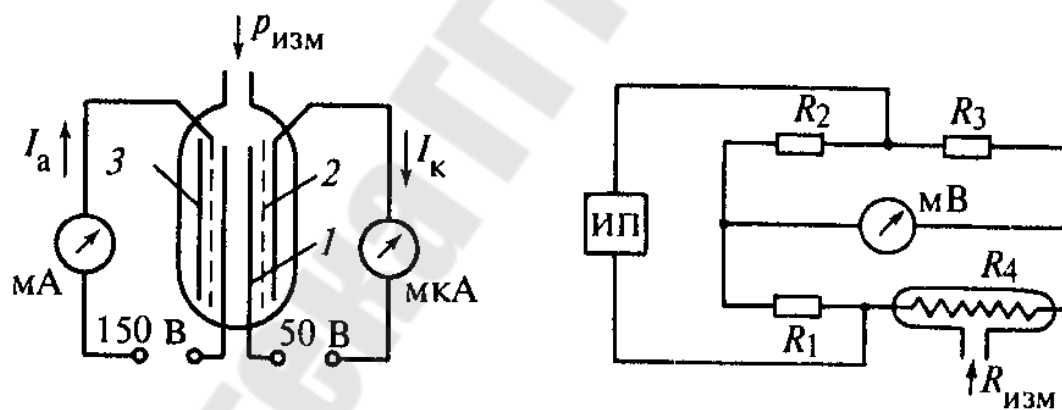


Рис. 5.12 Схемы ионизационного (а) и теплового (б) манометров:
1 – катод; 2 – анодная сетка; 3 – цилиндрический ионный коллектор

Основной элемент манометра – стеклянная манометрическая лампа, содержащая катод 1, который находится внутри анодной сетки 2, окруженной цилиндрическим ионным коллектором 3. Эжектируемые раскаленным катодом электроны ускоряются положительным напряжением, приложенным между анодом и катодом. При движении электроны ионизируют молекулы разреженного газа. Положительные ионы попадают на отрицательно заряженный кол-

лктор. При постоянстве анодного напряжения и электронной эмиссии величина коллекторного тока I_k зависит от измеряемого давления.

Тепловые манометры. Для измерения давления в диапазоне $1 \cdot 10^4$ Па ($10^{-2} \dots 10^2$ мм рт. ст.) используются тепловые манометры, которые, как и ионизационные, включают в себя манометрический преобразователь и измерительный блок. Принципиальная измерительная схема теплового манометра приведена на рис. 5.12б. Она представляет собой неуравновешенный мост, на который напряжение подается от стабилизированного источника питания ИП. Три плеча моста содержат постоянные резисторы $R_1 - R_3$, а четвертое представляет собой нагретую до 200 °С вольфрамовую нить, находящуюся в камере, куда подается измеряемое давление. При указанных давлениях вследствие снижения числа молекул длина их свободного пробега становится соизмеримой с расстояниями между теплопередающими поверхностями измерительных камер прибора, в связи с чем теплопроводность при давлениях 10^3 Па (10 мм рт. ст.) и ниже линейно уменьшается по мере снижения давления.

5.4 Грузопоршневые манометры

Для поверки и градуировки деформационных манометров используются в основном **грузопоршневые манометры**, которые как самостоятельные приборы для измерения давления не применяются.

Грузопоршневые манометры являются образцовыми приборами, так как обладают высокой чувствительностью и точностью. Приборы этого типа по точности приближаются к жидкостным манометрам, но в отличие от последних могут иметь большой диапазон измерений (до 250 МПа и выше).

Принцип действия грузопоршневого манометра заключается в уравновешивании давления измеряемой среды на свободно перемещающийся в цилиндре поршень силой, создаваемой калиброванным грузом. По массе этого груза определяют действующее на поршень давление.

На рис. 5.13 показана схема грузопоршневого манометра.

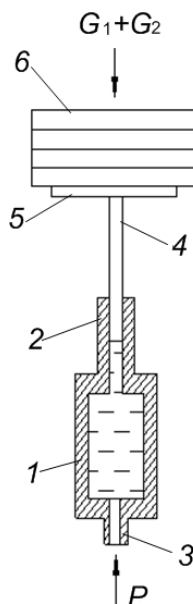


Рис. 5.13 Схема грузопоршневого манометра

В сосуд 1 с цилиндрической колонкой 2 заполненный маслом и сообщаемый посредством соединительного штуцера 3 с измеряемой средой, вставлен вертикально с небольшим зазором стальной поршень 4. С наружной стороны он скреплен с тарелкой 5, на которую в зависимости от измеряемого давления накладываются грузы 6 уравнивающие воспринимаемое поршнем давление p (Па) при равновесии системы определяемое по формуле

$$p = \frac{g_n (G_1 + G_2)}{F}, \quad (5.9)$$

где G_1 и G_2 – массы поршня с тарелкой и грузов, кг;

F – площадь поршня, m^2 ;

g_n – нормальное ускорение свободного падения тел, m/s^2 .

Поршень манометра шлифуется к внутренней поверхности колонки. В результате между ними образуется незначительный кольцевой зазор (около 3-5 мкм), что препятствует пропуску масла из колонки наружу и способствует движению поршня без излишнего трения.

Основным недостатком грузопоршневых манометров является влияние на их чувствительность трения поршня в цилиндре, что при измерении требует строго вертикальной установки манометра и проворачивания от руки поршня вокруг оси.

Схема поршневого манометра, имеющего диапазон измерения 6 МПа (МП-60), представлена на рис. 5.14. Поршень 1 с тарелкой 2 для грузов 3 перемещается внутри цилиндра 4. Поршневая пара подгоняется таким образом, чтобы зазор между поршнем и цилиндром не превышал 0,01 мм. Имея такой зазор даже при высоких давлениях скорость опускания поршня из-за утечки рабочей жидкостью не превышает 1 мм/мин.

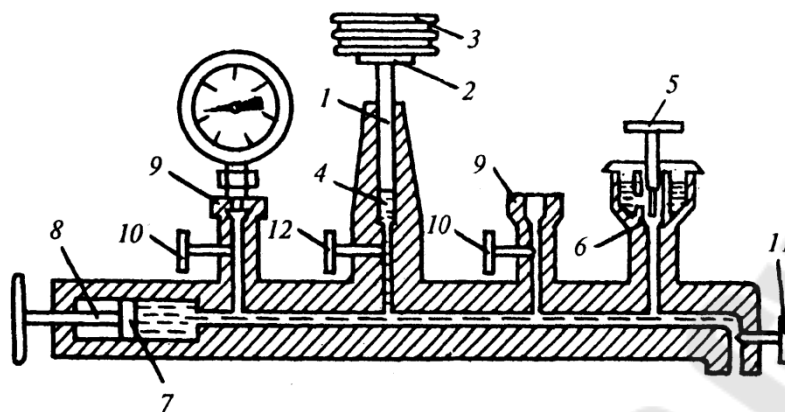


Рис. 5.14 Схема грузопоршневого манометра МП-60:

1 – поршень; 2 – тарелка; 3 – грузы; 4 – цилиндр; 5 – вентиль; 6 – резервуар; 7 – поршень винтового пресса; 8 – стояк; 9 – запорные вентили; 10-12 – запорные вентили

Для обеспечения равномерного зазора между цилиндром и поршнем последний в момент измерения вращают по часовой стрелке. В манометрах с диапазоном измерения 0,6 МПа и выше вращение поршня осуществляется вручную. В манометрах с диапазоном измерения 0,06 и 0,25 МПа вращение поршня производится электрическим двигателем.

Внутренняя полость поршневого манометра тщательно заполняется рабочей жидкостью (керосином, касторовым или трансформаторным маслом). Заливка жидкости производится при открытом вентиле 5 через отверстие в дне резервуара 6, поршнем 7 винтового пресса 8 жидкость засасывается внутрь манометра. С помощью пресса 8 в процессе измерения обеспечивается подъем поршня 1 с грузами до высоты, заданной указателем. К стоякам 9 с запорными вентилями 10 подключаются поверяемые манометры. Вентиль 11 служит для слива жидкости из поршневого манометра.

Проверка производится примерно в пяти отметках шкалы поверяемого прибора через одинаковые промежутки сначала при возрастании, а затем при понижении давления для тех же отметок. По достижении конечной отметки шкалы поверяемый манометр выдерживается под этим давлением в течение 5 мин с целью определения упругого последействия чувствительного элемента при последующем понижении давления. В каждой поверяемой отметке после отсчета показаний производится повторный отсчет после легкого постукивания пальцем по корпусу манометра. Скачкообразное перемещение указательной стрелки при сотрясении прибора указывает на наличие зазоров и чрезмерного трения в передаточном механизме.

5.5 Вакуумметры и мановакуумметры

Вакуумметры применяются для измерения значительного вакуумметрического давления (вакуума) в конденсаторах паровых турбин, во всасывающих линиях насосов и т. п. Относительное значение этого давления V , выраженное

в процентах, широко используется для оценки эффективности работы конденсационных установок турбин. Оно подсчитывается по формуле

$$V = \frac{735,6 - (B_0 - h_0)}{735,6} 100, \quad (5.10)$$

где B_0 – атмосферное давление, мм рт. ст. при температуре 0°C ;

h_0 – вакуумметрическое давление в конденсаторе турбины, мм рт. ст. при температуре 0°C .

Мановакуумметры применяются в тех случаях, когда измеряемое давление среды может принимать значение выше или ниже атмосферного. Эти приборы имеют двустороннюю шкалу.

По своему устройству вакуумметры и мановакуумметры бывают **жидкостные** (ртутные) и **деформационные** (трубчато-пружинные и сильфонные).

Ртутный вакуумметр сходен по принципу действия с однострубным жидкостным манометром. На рис. 5.15 дан общий вид однострубного вакуумметра.

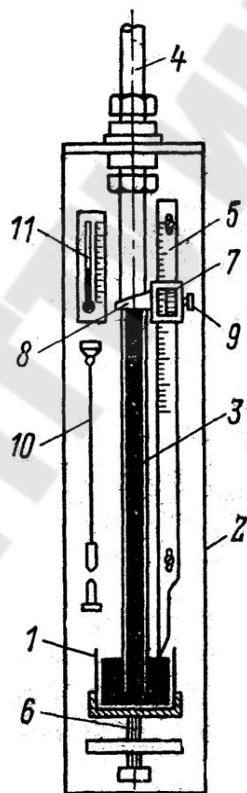


Рис. 5.15 Общий вид ртутного вакуумметра

Прибор состоит из стеклянного подвижного сосуда 1 с ртутью, в который опущен конец закрепленной в деревянном основании 2 стеклянной измерительной трубки 3, сообщающейся посредством трубки 4 с измеряемой средой. Около измерительной трубки укреплена миллиметровая шкала 5. Нулевая отметка шкалы находится на нижнем заостренном конце циферблата, касающем-

ся поверхности ртути в сосуде. Установка сосуда в положение, при котором острие циферблата касается ртути, производится ходовым винтом 6.

Для увеличения точности отсчета до десятых долей миллиметра шкала вакуумметра снабжена подвижной кареткой 7 с нониусом. Нулевая отметка шкалы нониуса находится на уровне горизонтальной части угольника 8, совмещаемой при отсчете с мениском ртути в измерительной трубке. Перемещение каретки с нониусом производится кремальерой 9.

Вакуумметр устанавливается в вертикальном положении при помощи отвеса 10. Для введения поправки на температуру столба ртути рядом с измерительной трубкой расположен ртутный термометр 11.

Жидкостный мановакуумметр, имеющий то же устройство, что и двухтрубный манометр (см. рис. 5.1), предназначен для измерений избыточного и вакуумметрического давлений среды в пределах до 100-1000 мм столба уравновешивающей жидкости (ртути, воды и др.). При измерении избыточного давления жидкость в приборе вытесняется в левую стеклянную трубку, а при измерении вакуумметрического давления – в правую.

Деформационные вакуумметры по своему устройству и принципу действия аналогичны трубчато-пружинным манометрам. Под влиянием атмосферного давления, действующего снаружи трубчатой пружины, и измеряемого вакуумметрического давления внутри пружины последняя изгибается, причем с увеличением разности этих давлений степень изгиба увеличивается.

Ртутные и деформационные вакуумметры и мановакуумметры устанавливаются так же, как жидкостные и деформационные манометры.

Проверка промышленных показывающих и самопишущих деформационных вакуумметров и мановакуумметров производится путем сравнения их показаний с образцовыми грузопоршневыми, трубчато-пружинными или ртутными приборами. Для создания при проверке вакуумметрического давления применяется вакуум-насос или водоструйный эжектор.

ГЛАВА 6 СПЕЦИАЛЬНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ

6.1 Приборы для измерения уровня

Измерение уровня жидкостей и сыпучих тел играет важную роль при автоматизации технологических процессов, особенно если поддержание уровня связано с условиями безопасной работы оборудования. Уровнемеры широко используются в пищевой, нефтяной и нефтеперерабатывающей промышленности, при производстве медикаментов и пищевых продуктов. **Уровнемеры** применяются либо для контроля за отклонением уровня от номинального и в этом случае они имеют двустороннюю шкалу, либо для определения количества вещества (в сочетании с известными размерами емкости) и в этом случае они имеют одностороннюю шкалу. Большую группу составляют сигнализаторы уровня, в которых выходной сигнал возникает при достижении уровнем верхнего или нижнего предельных значений.

В зависимости от условий измерения, характера контролируемой среды используются различные методы измерения уровня. Если нет необходимости в дистанционной передаче показаний, то уровень жидкости можно измерять **уровнемерами с визуальным отсчетом (указательные стекла)**. При необходимости дистанционного измерения уровня применяются более сложные уровнемеры: **гидростатические (дифманометрические и барботажные), буйковые и поплавковые, емкостные, индуктивные, радиоизотопные, волновые, акустические, термокондуктометрические**. Разнообразие принципов действия и конструктивных исполнений уровнемеров обусловлено их использованием для измерения уровня воды, растворов и суспензий, нефтепродуктов, границ раздела сред, содержащих взвеси, сыпучих тел в различных отраслях народного хозяйства.

6.1.1 Уровнемеры с визуальным отсчетом

Такие уровнемеры основаны на визуальном измерении высоты уровня жидкости. При невысоких давлениях среды высота уровня измеряется в стеклянной трубке (указательном стекле), сообщающейся с жидкостным и газовым пространствами контролируемого резервуара (рис. 6.1). При повышенных давлениях применяются плоские стекла, на поверхности которых со стороны жидкости нанесены вертикальные граненые канавки. Из условий прочности не рекомендуется применять указательные стекла длиной более 0,5 м, поэтому при большом диапазоне изменения уровня устанавливается несколько стекол в шахматном порядке таким образом, чтобы их диапазоны измерения перекрывались.

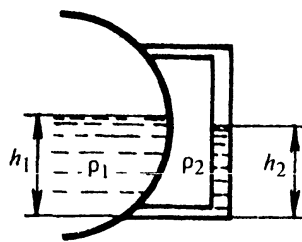


Рис. 6.1 Схема уровнемера с визуальным отсчетом

Основным источником дополнительной погрешности таких уровнемеров является разница плотностей жидкости в контролируемом резервуаре и в стекле, вызываемая различием температур (особенно если жидкость в резервуаре имеет высокую температуру, а указательное стекло находится на значительном удалении). Различие плотностей приводит к различию уровней в резервуаре h_1 , и указательном стекле h_2 (уровень в стекле иногда называют «весовым» уровнем); при этом абсолютная погрешность измерения может быть вычислена по формуле

$$\Delta h = h_2 - h_1 = h_2 \left(1 - \frac{\rho_2}{\rho_1} \right), \quad (6.1)$$

где ρ_1 и ρ_2 – плотности жидкости в резервуаре и указательном стекле.

Погрешность может достигать существенных значений, поэтому в целях ее уменьшения необходима либо тепловая изоляция уровнемера, либо продувка его жидкостью из резервуара перед отсчетом.

6.1.2 Гидростатические уровнемеры

В этих уровнемерах измерение уровня H жидкости постоянной плотности ρ сводится к измерению гидростатического давления p , создаваемого жидкостью, причем

$$p = H\rho g \quad (6.2)$$

Измерение высоты уровня непосредственно по величине гидростатического давления можно производить в резервуарах, находящихся как под атмосферным, так и под отличающимся от него давлением. На рис. 6.2 представлена схема зонда серии MPS фирмы Siemens. Зонд представляет собой трубку 1, внутренняя полость которой сообщается с жидкостью. Таким образом, давление внутри трубки совпадает с давлением жидкости. В нижней части трубки 1 находится измерительная мембрана из нержавеющей стали. Ее деформация вызывает изменение сопротивления тензомоста. Измерительная мембрана, тензопреобразователь и электроника защищены от измеряемой среды колпаком 2. Вентиляционная трубка соединена с пространством под измерительной мембраной и атмосферой. Мягкая трубка 3 может иметь длину до 20 м, в ней размещены несущий тросика, экранированные токовые выводы б, вентиля-

ционная трубка в диаметре 1 мм. Зонд выдерживает перегрузку до 0,6 МПа, выходной сигнал составляет 4...20 мА, погрешность не превышает $\pm 0,3\%$.

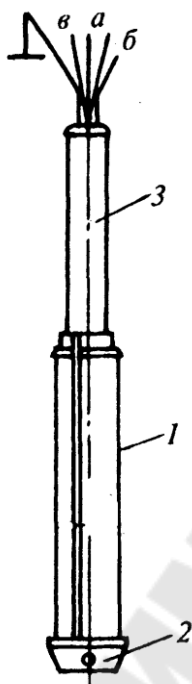


Рис. 6.2 Схема гидростатического уровнемера:
1 – трубка; 2 – колпак; 3 – мягкая трубка

Если в трубке, соединяющей газовое пространство над жидкостью с полостью статического давления преобразователя, образуется конденсат, то для измерения уровня используются дифманометры с дополнительными устройствами для стабилизации уровня конденсата. Гидростатический уровнемер, в котором гидростатическое давление жидкости измеряется дифманометром, называется **дифманометрическим**. Гидростатический уровнемер, в котором гидростатическое давление жидкости преобразуется в давление воздуха, называется **пневмоуровнемером**. Разновидностью пневмоуровнемера является **барботажный уровнемер**, в котором воздух, подаваемый от постороннего источника, барботирует через слой жидкости.

6.1.3 Дифманометрические уровнемеры

Схема подключения дифманометра к открытому резервуару, находящемуся под атмосферным давлением, изображена на рис. 6.3. Обе импульсные трубки дифманометра 2 заполняются контролируемой жидкостью (если она не агрессивна). Дифманометр измеряет разность давлений p_1 и p_2 , действующих на его чувствительный элемент.

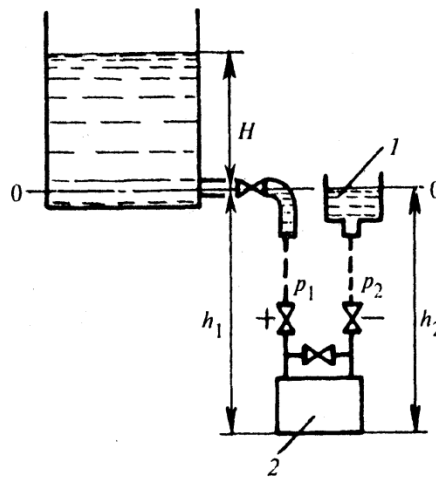


Рис. 6.3. Схема подключения дифманометра при измерении уровня в открытом резервуаре:

1 – уравнивающий сосуд; 2 – дифманометр

В соответствии с (6.2) можно записать выражения для этих давлений:

$$p_1 = (H + h_1) \rho_1 g ; \quad (6.3)$$

$$p_2 = h_2 \rho_2 g . \quad (6.4)$$

Таким образом, дифманометр будет измерять перепад давлений, выражающийся через контролируемый уровень H

$$\Delta p = p_1 - p_2 = (H + h_1) \rho_1 g - h_2 \rho_2 g \quad (6.5)$$

Если плотности ρ_1 и ρ_2 жидкости в обеих импульсных трубках одинаковы и если $h_1 = h_2$, то

$$\Delta p = H \rho g , \quad (6.6)$$

где $\rho = \rho_1 = \rho_2$.

Из (6.5) и (6.6) видно, что дифманометрический уровнемер измеряет «весовой» уровень, т.е. его показания будут изменяться при изменении плотности контролируемой среды. Погрешность в показаниях также появится, если имеется разность плотностей ρ_1 и ρ_2 в импульсных трубках (для исключения этой погрешности импульсные трубки прокладываются рядом).

6.1.4 Поплавковые и буйковые уровнемеры

Поплавковым называется уровнемер, основанный на измерении положения поплавка, частично погруженного в жидкость, причем степень погружения поплавка (осадка) при неизменной плотности жидкости не зависит от контролируемого уровня. Поплавок перемещается вертикально вместе с уровнем жидкости, и, следовательно, по его положению может быть определено значение уровня. В статическом режиме на поплавок действуют: сила тяжести G и

выталкивающие силы жидкости и газовой среды. При перемещении поплавка появляется также сила сопротивления в подвижных элементах уровнемера. Если пренебречь силой сопротивления кинематики и выталкивающей силой газовой фазы, то действующие на поплавок силы связаны уравнением

$$G = V_{\text{ж}} \rho_{\text{ж}} g, \quad (6.7)$$

где $V_{\text{ж}}$ – объем погруженной части поплавка;

$\rho_{\text{ж}}$ – плотность жидкости.

Объем $V_{\text{ж}}$ однозначно определяет осадку (глубину погружения) поплавка и является параметром, определяющим дополнительную погрешность, вызванную изменением плотности контролируемой жидкости. Для снижения этой погрешности целесообразно уменьшить осадку поплавка, что может быть достигнуто либо увеличением площади поперечного сечения поплавка, либо облегчением поплавка.

В простейшем случае поплавков соединен с указателем с помощью гибкой механической связи. Размеры поплавка ограничиваются размерами уровнемера, масса поплавка не может быть сильно уменьшена из-за необходимости обеспечения требуемого натяжения гибкого элемента и преодоления сил трения. Сила сопротивления определяется выбором схемы связи поплавка с измерительной схемой уровнемера. Такая конструкция имеет большой диапазон измерения, но не обеспечивает хорошей герметизации резервуара, поэтому используется только при небольшом избыточном давлении или разрежении и невысоких температурах контролируемой среды. Примером такого уровнемера являются уровнемеры типа УДУ. Они предназначены для измерения уровня нефтепродуктов с температурой $(-50...50)^\circ\text{C}$, в интервале избыточных давлений $(-1,5...3)$ кПа. Диапазоны измерения $0...12$ или $0...20$ м, основная погрешность ± 4 мм.

При более высоких значениях температуры и давления среды используются поплавковые уровнемеры с магнитными преобразователями. Примером таких приборов являются магнитные уровнемеры типа ПМП (рис. 11.14) НПП «СЕНСОР». По направляющей трубе 7 под влиянием изменения уровня жидкости перемещается поплавок 6 с постоянным магнитом 5. Внутри трубки 7 по всей ее длине находятся герконовые реле, которые срабатывают под действием магнитного поля поплавка. Стопорное кольцо 4 ограничивает перемещение поплавка вверх, а зонтик 3 защищает его от капель конденсата, который может образовываться на внутренних стенках резервуара. При диапазоне измерения от 0,5 до 6 м высота уровня измеряется с дискретностью 5 мм. При определении массы для учета изменения плотности жидкости в преобразователе производится измерение температуры. Эти преобразователи могут иметь в качестве выходной величины изменение сопротивления, токовый сигнал $4...20$ мА или цифровой.

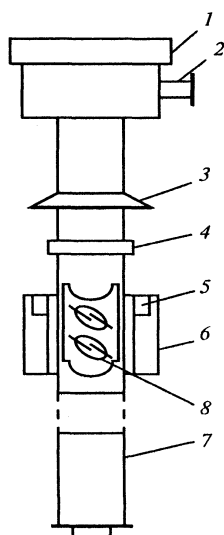


Рис. 6.4. Схема уровнемера ПМП:

1 – корпус; 2 – кабельный вывод; 3 – зонтик; 4 – стопорное кольцо; 5 – постоянный магнит; 6 – поплавок; 7 – направляющая трубка; 8 – герконовое реле

Магнитные поплавки входят в состав ультразвуковых уровнемеров.

Буйковыми называются уровнемеры, основанные на законе Архимеда: зависимости выталкивающей силы, действующей на буюк, от уровня жидкости. Чувствительным элементом таких уровнемеров является массивное тело (например, цилиндр) – буюк, подвешенное вертикально внутри сосуда и частично погруженное в контролируемую жидкость (рис. 6.5).

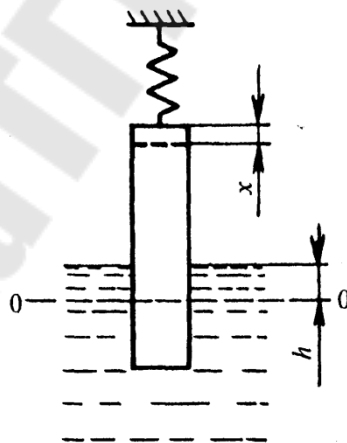


Рис. 6.5 Расчетная схема буйкового уровнемера

Буюк закреплен на упругой подвеске с жесткостью c , действующей на буюк с определенным усилием (на рис. 6.5 таким элементом является пружина). Увеличивая уровень на H от нулевого положения 00, увеличиваем выталкивающую силу, что вызывает подъем буйка на x , причем при его подъеме увеличивается осадка, т.е. $x < h$. При этом изменяется усилие, с которым подвеска действует на буюк, причем изменение равно изменению выталкивающей силы,

вызванной увеличением осадки буйка на $(h-x)$:

$$xc = (h-x)\rho_{ж}gF - (h-x)\rho_2gF, \quad (6.8)$$

где c – жесткость подвески;

$\rho_{ж}$, ρ_2 – плотность жидкости и газа;

F – площадь поперечного сечения буйка.

Отсюда легко получить выражение для статической характеристики буйкового уровнемера:

$$x = \frac{h}{c(\rho_{ж} - \rho_2)gF} \quad (6.9)$$

Таким образом, статическая характеристика буйкового уровнемера линейна, причем чувствительность его может быть изменена за счет увеличения F или уменьшения жесткости подвески c .

6.1.5 Емкостные уровнемеры

Емкостными называются уровнемеры, основанные на зависимости электрической емкости конденсаторного преобразователя, образованного одним или несколькими стержнями, цилиндрами или пластинами, частично введенными в жидкость, от ее уровня.

Конструкция конденсаторных преобразователей различна для электропроводных и неэлектропроводных жидкостей. **Электропроводными** считаются жидкости, имеющие, удельное сопротивление $\rho < 10^6$ Ом·м и диэлектрическую проницаемость $\epsilon_{ж} \geq 7$. Различие преобразователей состоит в том, что один из электродов уровнемеров для электропроводных жидкостей покрыт изоляционным слоем, электроды преобразователей для неэлектропроводных жидкостей не изолированы. Электроды могут быть в виде плоских пластин, стержней. В качестве электрода может использоваться металлическая стенка сосуда. Часто применяются цилиндрические электроды, обладающие по сравнению с другими формами электродов хорошей технологичностью, лучшей помехоустойчивостью и обеспечивающие большую жесткость конструкции.

Конденсаторный преобразователь для неэлектропроводных жидкостей, состоящий из двух коаксиально расположенных электродов 1 и 2, помещенных в резервуар 3, в котором производится измерение уровня, изображен на рис. 6.6.

Взаимное расположение электродов зафиксировано проходным изолятором 4. Электроды образуют цилиндрический конденсатор, часть межэлектродного пространства которого высотой H заполнена контролируемой жидкостью, оставшаяся часть высотой $H-h$ – ее парами.

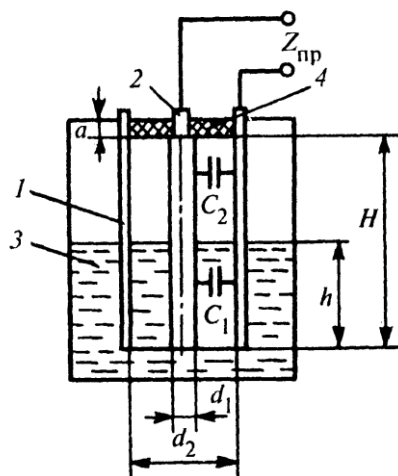


Рис. 6.6. Схема конденсаторного преобразователя уровня для неэлектропроводных сред: 1,2 – электроды; 3 – резервуар; 4 – изолятор

6.1.6 Индуктивные уровнемеры

Принцип действия индуктивных уровнемеров основан на зависимости индуктивности одиночной катушки или взаимной индуктивности двух катушек от глубины их погружения в электропроводную жидкость. Такая зависимость обусловлена возникновением в жидкости под воздействием магнитного поля переменного тока возбуждения вихревых токов, магнитное поле которых оказывает размагничивающее действие на поле тока возбуждения. Действительно, по определению индуктивность L катушки представляет собой отношение магнитного потока Φ к току I , создающему этот поток: $L = \Phi / I$. При погружении катушки в жидкость в ней создаются вихревые токи, магнитное поле которых по закону Ленца направлено навстречу основному, т.е. результирующий магнитный поток будет меньше потока «сухой» катушки. Это означает, что индуктивность погруженной катушки меньше индуктивности сухой катушки.

Простейшая схема индуктивного трансформаторного преобразователя представлена на рис. 6.7.

Преобразователь состоит из обмотки возбуждения 1, по которой протекает переменный ток возбуждения I_e , и вторичной обмотки 2, с которой снимается выходной сигнал $U_{\text{вых}}$. Преобразователь помещен в металлический защитный чехол 3, который герметично закреплен в крышке резервуара.

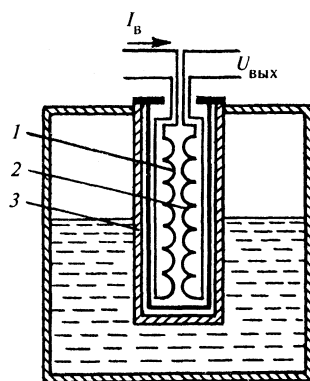


Рис. 6.7. Схема индуктивного трансформаторного преобразователя уровня (аналогового уровнемера):

1 – обмотка возбуждения; 2 – вторичная обмотка; 3 – металлический защитный чехол

Это позволяет осуществлять замену уровнемера без нарушения герметичности контура. Как уже указывалось, под действием потока возбуждения в толще контролируемой среды (например, жидкого металла) возникают вихревые токи. Это приводит к зависимости взаимной индуктивности M между обмотками от уровня металла. Эта зависимость линейна по всей длине обмоток, кроме концевых участков, длиной, равной их диаметру, где характеристика искривляется.

Таким образом, ЭДС $E = \omega M I_{\text{в}}$ во вторичной обмотке, а следовательно, и выходное напряжение $U_{\text{вых}}$ будут линейно зависеть от уровня. Из рис. 6.7 видно, что взаимодействие полей возбуждения и вихревых токов осуществляется через металлический защитный чехол, который ослабляет поля и, следовательно, ухудшает чувствительность преобразователя, причем экранирующее действие чехла увеличивается с ростом частоты ω тока возбуждения $I_{\text{в}}$. Однако выбирать низкое значение ω нецелесообразно, так как при этом уменьшается ЭДС E во вторичной обмотке, а следовательно, и $U_{\text{вых}}$ (обычно частота выбирается равной 4...5 кГц).

Основной недостаток трансформаторных преобразователей уровня – влияние изменения температуры контролируемой среды на результат измерения. Это влияние обусловлено изменением активного сопротивления обмоток в зависимости от изменения температуры и изменением их индуктивности в связи с линейным расширением провода, а также изменением проводимости чехла и контролируемой среды. Кроме того, на результат измерения будут оказывать влияние изменения состава среды, а также изменение со временем свойств материалов чехла. При измерении уровня жидких металлов влияние будет оказывать также наличие на чехле пленки расплава или пленки оксидов. Автоматическая компенсация этих погрешностей представляет собой трудную задачу из-за сложности измерения влияющих величин и сложного характера влияния их на погрешность.

6.1.7 Радиоволновые уровнемеры

Рассмотренные уровнемеры можно считать уровнемерами общепромышленного назначения, так как они могут быть использованы в подавляющем большинстве случаев, требующих измерения уровня. Существуют, однако, технологические процессы, требующие измерения уровня, но характеризующиеся тяжелыми условиями работы уровнемеров. К числу таких процессов относятся, например, процессы металлургического производства, в которых требуется измерение уровня жидкого металла. Особые условия работы уровнемеров обусловлены высокой температурой жидкого металла, агрессивностью жидкого металла и шлака, разнообразием конструкций объектов измерения, требуемой высокой точностью измерения и надежностью работы.

Перспективным методом измерения уровня является радиоволновой метод. **Радиоволновыми** называются уровнемеры, основанные на зависимости параметров колебаний электромагнитных волн от высоты уровня жидкости.

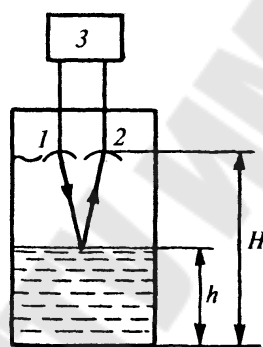


Рис. 6.8 Схема радиолокационного уровнемера:

1 – излучатель; 2 – приемник электромагнитной энергии; 3 – преобразователь измерения интервала времени

К радиоволновым методам относятся радиолокационный, радиоинтерференционный, эндовибраторный и резонансный.

Работа радиолокационных уровнемеров основывается на явлении отражения электромагнитных волн от границы раздела различающихся электрическими и магнитными свойствами.

Схема уровнемера (рис. 6.8) состоит из излучателя 1, приемника электромагнитной энергии 2 и преобразователя 3 измерения интервала времени. Уровень h определяется измерением временного интервала между моментом посылки сигнала излучателем 1 и приходом отраженного сигнала на приемник 2.

6.1.8 Акустические уровнемеры

По принципу действия акустические уровнемеры можно подразделить на **локационные, поглощения и резонансные**.

В **локационных** уровнемерах используется эффект отражения ультразву-

ковых колебаний от границы раздела жидкость-газ, в связи с чем они получили название **ультразвуковых**. Положение уровня определяется по времени прохождения ультразвуковых колебаний от источника до приемника после отражения их от поверхности раздела. В уровнемерах поглощения положение уровня определяется по ослаблению интенсивности ультразвука при прохождении через слои жидкости и газа. В резонансных уровнемерах измерение уровня производится посредством измерения частоты собственных колебаний столба газа над уровнем жидкости, которая зависит от высоты уровня.

Наибольшее распространение получили локационные уровнемеры. Локация уровня может производиться либо через газовую среду над жидкостью, либо снизу через слой жидкости. Недостатком первого типа уровнемеров является погрешность от зависимости скорости звука от давления и температуры газа и сильное поглощение ультразвука газом, что требует большей мощности источника, чем при локации через жидкость. Однако на показания таких уровнемеров не сказываются изменения характеристик жидкости, поэтому они могут быть использованы для измерения уровня жидкостей неоднородных, содержащих пузырьки газа или кристаллизующихся. Уровнемеры с локацией через жидкость могут быть использованы для сред под высоким давлением, для них требуется небольшая мощность источника, однако они чувствительны к включениям в жидкость, например к пузырькам газа при вскипании. Поэтому эти уровнемеры применимы только для однородных жидкостей. Кроме того, они также чувствительны к изменению температуры и давления среды из-за зависимости от них скорости распространения ультразвука.

Упрощенная схема акустического уровнемера с локацией уровня со стороны газа ЭХО-1 представлена на рис. 6.9. Источником и одновременно приемником отраженных ультразвуковых колебаний является пьезоэлемент, заключенный в акустический преобразователь 1. Локация осуществляется ультразвуковыми импульсами, которые возбуждаются пьезоэлементом в результате подачи на него электрических импульсов от генератора 2. Одновременно генератор включает схему измерения времени 4.

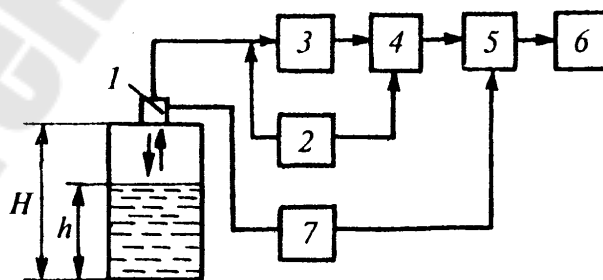


Рис. 6.9 Упрощенная схема акустического уровнемера:

1 – акустический преобразователь; 2 – генератор; 3 – усилитель; 4 – схема измерения времени; 5 – преобразователь; 6 – вторичный прибор; 7 – блок температурной компенсации

Отраженный ультразвуковой импульс возвращается на пьезоэлемент через время t , соответствующее контролируемому уровню в соответствии с вы-

ражением

$$t=2(H-h)/c, \quad (6.10)$$

где c – скорость ультразвука в газе.

Пьезоэлемент преобразует отраженный ультразвуковой импульс в электрический сигнал, который усиливается усилителем 3 и подается на схему измерения времени 4. Преобразователь 5 преобразует значение времени в унифицированный выходной сигнал 0...5 мА, измеряемый вторичным прибором 6. Для уменьшения влияния изменения температуры газа имеется блок температурной компенсации 7, включающий в себя термопреобразователь сопротивления, расположенный внутри акустического преобразователя.

6.1.9 Термокондуктометрические уровнемеры

Термокондуктометрическими называются уровнемеры, элементом электрической цепи которых является нагреваемый током резистор с большим температурным коэффициентом электросопротивления, электрическое сопротивление которого зависит от уровня жидкости. Принцип действия таких уровнемеров основан на различии условий теплообмена в жидкостях и газах. Чувствительный элемент таких уровнемеров представляет собой протяженный терморезистор, электрическое сопротивление которого определяется его температурой, причем чувствительность преобразователя увеличивается с ростом температурного коэффициента электросопротивления материала.

Термокондуктометрический преобразователь помещается в резервуар таким образом, что часть его находится в жидкости, остальная часть – в газовом пространстве (рис. 6.10). При изменении уровня изменяется длина этих участков. Так как в общем случае температура жидкости и ее паров может быть одинаковой, то происходит подогрев преобразователя. Прямой подогрев осуществляется проходящим через преобразователь током постоянной силы. При косвенном подогреве преобразователь должен иметь дополнительный подогреватель.

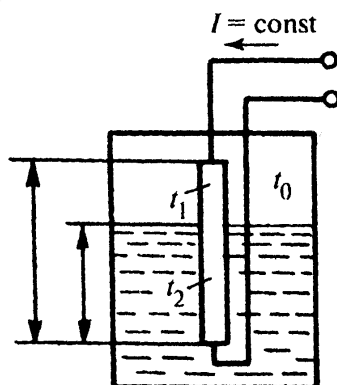


Рис. 6.10. Схема термокондуктометрического преобразователя уровня

Принцип действия термокондуктометрического преобразователя заключается в использовании различия теплоотдачи от нагретого терморезистора к жидкости и газу, вследствие чего участки его, находящиеся в жидкости и газе, имеют различную температуру и, следовательно, различное сопротивление. Таким образом, суммарное их сопротивление будет определяться уровнем.

6.1.10 Измерение уровня сыпучих материалов

Имеется ряд обстоятельств, усложняющих задачу измерения уровня сыпучих материалов по сравнению с измерением уровня жидкостей. Прежде всего это неоднородность веществ в объеме, связанная с наличием пространства между твердыми частицами, заполненного газом. Степень неоднородности зависит от размеров частиц и непосредственно влияет на физические свойства материала, что усложняет применение методов измерения уровня, использующих определенные физические свойства. Следующая трудность измерения уровня обусловлена ограниченной подвижностью частиц из-за действия сил трения и сцепления между частицами, результатом чего является отсутствие горизонтальной плоскости раздела газ – материал. Поверхность сыпучего материала расположена к горизонтали под углом естественного откоса, причем этот угол при заполнении или опорожнении емкости может быть различным. Ограниченная подвижность частиц приводит к сводообразованию, нарушающему нормальную работу измерительных устройств. Следствием ограниченной подвижности является зависимость давления внутри сыпучей массы от ориентации единичной площадки, формы бункера, коэффициента трения материала о стенки, что ограничивает применение методов измерения уровня, основанных на зависимости давления от уровня (по типу гидростатических).

Отрицательными качествами сыпучих материалов является способность к налипанию и абразивное воздействие. Усложнить работу уровнемеров может также запыленность газового пространства, что влияет на электрические свойства среды, а также предъявляет повышенные требования к обеспечению взрывобезопасности.

Простейшими по принципу действия уровнемерами для сыпучих материалов являются **массовые**, основанные на взвешивании бункера вместе с заполняющим его материалом. В качестве преобразователя в этих уровнемерах может быть использована гидравлическая мессдоза, которая служит опорой одной из лап бункера. **Мессдоза** представляет собой стальной корпус с поршнем, на который опирается лапа бункера. Поршень давит на герметизирующую металлическую мембрану. Внутренняя полость корпуса (под мембраной) заполнена жидкостью и соединена с манометром. Давление жидкости в системе мессдоза-манометр равно силе тяжести бункера с материалом, деленной на площадь поршня. Манометр градуируется в единицах массы или уровня. Погрешность таких уровнемеров достигает $\pm 10\%$. В массовых уровнемерах вместо мессдозы могут применяться и более совершенные магнитоупругие преобразователи,

обеспечивающие более высокую точность измерения (их погрешность не более $\pm 5\%$). Основным элементом таких преобразователей – металлический чувствительный элемент, магнитная проницаемость которого изменяется при упругой механической деформации. Магнитоупругие преобразователи устанавливаются под опоры бункера и включаются в схему неуравновешенного моста, выходной сигнал которого зависит от степени деформации преобразователя, т.е. от количества материала в бункере.

Из всех электрических методов измерения уровня наиболее применимым является емкостный метод. Это объясняется как простотой конструкции емкостного преобразователя, так и малой чувствительностью их к неоднородностям. Как правило, преобразователи применяются одноэлектродными в виде зондов или изолированных тросов, вторым электродом является стенка бункера или вспомогательный электрод.

Основной недостаток таких уровнемеров – разрушение изоляционного покрытия преобразователя, налипание материала, зависимость показаний от изменения электрических свойств материала, вызванного, например, изменением его состава или влажности.

Специфическим уровнемером для сыпучих материалов является **лотовый** (рис. 6.11). Чувствительным элементом таких уровнемеров представляет массивное тело – **лот** 1, подвешенное на гибком тросе 2. В начале цикла измерений лот зафиксирован в предельном верхнем положении. Цикл измерения уровня начинается с момента растормаживания лота, при этом под действием собственного веса лот начинает опускаться. В этот же момент сигнальным устройством 3, реагирующим на натяжение троса, включается отсчетное устройство 4, регистрирующее смещение лота относительно первоначального предельного положения. В момент касания лотом поверхности натяжение троса уменьшается и сигнальное устройство отключает отсчетное устройство, одновременно включая механизм подъема лота 5, возвращающее лот в исходное положение, после чего цикл измерения повторяется. Показания отсчетного устройства позволяют определить текущее значение уровня. Перед началом следующего цикла измерения показания отсчетного устройства должны быть сброшены. По такой схеме работает уровнемер сыпучих тел УСТ-2 (пределы измерения 0...25 м, основная относительная погрешность $\pm 2,5\%$).

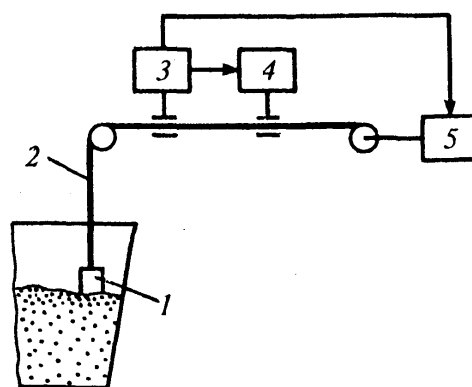


Рис. 6.11 Схема лотового уровнемера сыпучих материалов:

1 — лот; 2 — гибкий трос; 3 — сигнальное устройство; 4 — отсчетное устройство;
5 — механизм подъема лота

Возможен бесконтактный вариант лотового уровнемера. В схеме такого уровнемера чувствительный элемент — лот не касается поверхности материала, а при любом уровне удерживается на определенном расстоянии от поверхности. Принцип действия основан на зависимости какого-либо реактивного параметра (емкости или индуктивности) чувствительного элемента — лота от положения относительно поверхности материала. Если при исходном положении лота уровень увеличился (т.е. поверхность материала приблизилась к лоту), то изменится его реактивный параметр и следящая система поднимет лот в такое положение, при котором значение реактивного параметра восстановится. Это означает, что положение лота относительно поверхности восстановилось, т.е. по положению лота можно судить об уровне материала. Положение лота измеряется электромеханической схемой и преобразуется в выходной сигнал. Примером такого уровнемера служит уровнемер РУДА-ЛОТ для сыпучих мелкодисперсных материалов. Его верхние пределы измерения от 6 до 40 м, класс 0,5, выходной сигнал аналоговый или цифровой.

6.2 Приборы измерения расхода жидкости, пара, газа и воздуха

При измерениях, связанных с учетом количества вещества, важнейшими исходными понятиями являются количество вещества и расход.

Количество вещества можно измерять либо в единицах массы [килограмм (кг), тонна (т)], либо в единицах объема [кубический метр (м^3), литр (л)]. **Расход** есть количество вещества, протекающего через сечение трубопровода в единицу времени. В соответствии с выбранными единицами может производиться измерение либо **массового расхода** G_m (единицы кг/с, кг/ч, т/ч), либо **объемного расхода** G_0 (единицы $\text{м}^3/\text{с}$, л/с, $\text{м}^3/\text{ч}$). Единицы массы и массового расхода дают более полные сведения о количестве или расходе вещества, чем

единицы объема, так как объем вещества, особенно газов, зависит от давления и температуры. При измерении объемных расходов газов для получения сопоставимых значений результаты измерения приводят к определенным (так называемым нормальным) условиям. Такими нормальными условиями принято считать температуру $t_n=20$ °С, давление $p_n=101,325$ кПа (760 мм рт. ст.) и относительную влажность $\varphi=0$. В этом случае объемный расход обозначается G_n и выражается в объемных единицах (например, м³/ч).

В соответствии с ГОСТ-15528 измерительный прибор, служащий для измерения расхода вещества, называется расходомером, а прибор для измерения количества вещества – счетчиком количества (счетчиком). В каждом конкретном случае к этим терминам следует добавлять наименование контролируемой среды. Во многих случаях показания расходомеров суммируются во времени и используются, как и показания счетчиков, для определения количеств израсходованного газа, отпущенной горячей воды или пара при проведении коммерческих расчетов или определении экономических показателей работы оборудования. Эта особенность использования расходомеров и счетчиков обусловили специфику нормирования их метрологических характеристик. В отличие от рассмотренных средств измерений у расходомеров и счетчиков в большинстве случаев нормируется предел основной относительной погрешности, который может зависеть от величины измеряемого расхода.

Существует большое разнообразие методов измерения расхода и конструктивных разновидностей расходомеров и счетчиков. Наибольшее распространение получили следующие разновидности расходомеров: **переменного перепада давления с сужающими устройствами; постоянного перепада давления; тахометрические; электромагнитные; ультразвуковые; вихревые; массовые**. Большинство выпускаемых в настоящее время расходомеров и счетчиков являются микропроцессорными приборами с широкими функциональными возможностями. Благодаря энергонезависимой памяти, измеренные значения суточных и месячных расходов веществ хранятся в течение 1-3 лет. Эта информация может вызываться на цифровой дисплей приборов, к их цифровому выходу могут подключаться ПК и принтеры. С использованием различных интерфейсов микропроцессорные расходомеры и счетчики соединяются с локальными компьютерными сетями, при этом информация от приборов может передаваться по телефонным и радиоканалам, оптическим кабелям.

6.2.1 Основы теории измерения расхода по перепаду давления в сужающих устройствах

Данный метод измерения расхода основан на зависимости перепада давления в неподвижном сужающем устройстве (СУ), устанавливаемом в трубопроводе, от расхода измеряемой среды. Это устройство следует рассматривать как первичный преобразователь расхода. Создаваемый в сужающем устройстве перепад давления измеряется дифманометром, который может быть показыва-

ющим со шкалой в единицах расхода. Метод измерения расхода является наиболее отработанным, сужающие устройства и дифманометры для них выпускают все крупнейшие приборостроительные фирмы мира. Для измерения расхода пара, газа, жидкостей в трубопроводах диаметром свыше 300 мм в основном используется этот метод.

Рассматриваемый принцип измерения заключается в том, что при протекании потока через отверстие сужающего устройства повышается скорость потока по сравнению со скоростью до сужения. Увеличение скорости, а следовательно, и кинетической энергии вызывает уменьшение потенциальной энергии и соответственно статического давления. Расход может быть определен при известной градуировочной характеристике $G = f(\Delta p)$ по перепаду давления Δp на сужающем устройстве, измеренному дифманометром. Использование рассматриваемого метода измерения требует выполнения определенных условий:

- характер движения потока до и после сужающего устройства должен быть турбулентным и стационарным;
- поток должен полностью заполнять все сечение трубопровода;
- фазовое состояние потока не должно изменяться при его течении через сужающее устройство; пар является перегретым, при этом для него справедливы все положения, касающиеся измерения расхода газа;
- во внутренней полости трубопровода до и после сужающего устройства не образуются осадки и другие виды загрязнений;
- на поверхностях сужающего устройства не образуются отложения, изменяющие его геометрию.

Сужающие устройства условно подразделяются на **стандартные, специальные** и **нестандартные**. Стандартными называются сужающие устройства, которые рассчитаны, изготовлены и установлены в соответствии с руководящим нормативным документом ГОСТ 8.569.1-97 [24]. К числу специальных относятся стандартные диафрагмы для трубопроводов с внутренним диаметром менее 50 мм. Сужающие устройства, не относящиеся к этим двум группам, называются нестандартными. Градуировочная характеристика стандартных сужающих устройств определяется с помощью расчетов без индивидуальной градуировки. Этот момент обусловил широкое применение данного метода для измерения расходов воды, пара, газа в трубопроводах больших диаметров. Градуировочные характеристики нестандартных сужающих устройств определяются в результате индивидуальной градуировки.

Этому методу присущи следующие недостатки:

- узкий динамический диапазон, не превышающий трех-пяти при использовании одного дифманометра;
- диаметр трубопровода должен быть более 50 мм, в противном случае необходима индивидуальная градуировка;
- значительные длины линейных участков;
- наличие потери давления.

В качестве стандартных сужающих устройств для измерения расхода

жидкостей, газов и пара используются **диафрагмы, сопла** и значительно реже **трубы и сопла Вентури**. Диафрагма (рис. 6.12а) представляет собой тонкий диск с круглым отверстием, ось которого располагается по оси трубы. Передняя (входная) часть отверстия имеет цилиндрическую форму, а затем переходит в коническое расширение. Передняя кромка отверстия должна быть прямоугольной (острой) без закруглений и заусениц. Диапазон рабочих чисел Re зависит от относительного диаметра СУ и для диафрагмы он составляет от 10^5 до 10^8 .

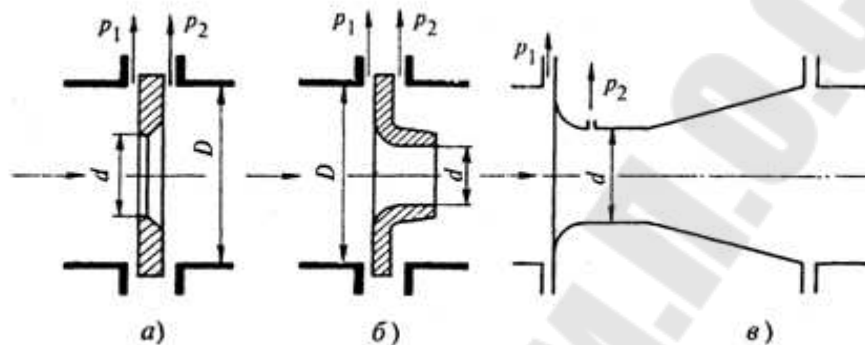


Рис. 6.12 Стандартные сужающие устройства:

а – диафрагма; *б* – сопло; *в* – сопло Вентури

Сопло (рис. 6.12б) имеет спрофилированную входную часть, переходящую затем в цилиндрический участок диаметром d (его значение входит в уравнения расхода). Задняя торцевая часть сопла включает цилиндрическую выточку диаметром, большим d , кромки цилиндрической части сопла от повреждения. При измерении расхода стандартные сопла устанавливаются на трубопроводах диаметром не менее 50 мм, числа Re потока при этом должны составлять $2 \cdot 10^4 \dots 10^7$.

Сопло Вентури (контур показан на рис. 6.12в) содержит входную часть с профилем сопла, переходящую в цилиндрическую часть, и выходной конус (может быть длинным или укороченным). Минимальный диаметр трубопровода для стандартных сопел Вентури составляет 65 мм. Их используют в диапазоне чисел Re от $1,5 \cdot 10^5$ до $2 \cdot 10^6$. На рис. 6.12 символами p_1 и p_2 отмечены точки отбора давлений, подаваемых на дифманометр.

6.2.2 Расходомеры постоянного перепада давления, тахометрические и электромагнитные

Ротаметры

Наиболее распространенными представителями расходомеров постоянного перепада являются **ротаметры**. Ротаметры используются в промышленных и лабораторных условиях для измерения небольших объемных расходов жидкостей (верхние пределы от 0,002 до 70 м³/ч) или газов (верхние пределы от 0,05

до $600 \text{ м}^3/\text{ч}$) в вертикальных трубопроводах диаметром $3...150 \text{ мм}$.

Ротаметры обладают рядом достоинств: простота устройства; возможность измерения малых расходов однофазных жидкостей и газов в трубопроводах малых диаметров; высокая точность при индивидуальной градуировке прибора; малая потеря давления; практически равномерная шкала; динамический диапазон достигает десяти.

Недостатками ротаметров являются необходимость установки только на вертикальных участках трубопроводов; трудности дистанционной передачи показаний и записи; непригодность для измерения расхода сред с высокими давлением и температурой.

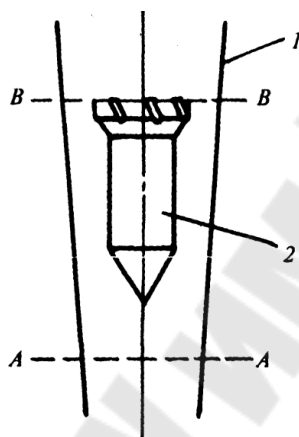


Рис. 6.13 Схема ротаметра:
1 – стеклянная трубка; 2 – поплавок

В простейшем виде ротаметр представляет собой вертикальную коническую (расходящуюся вверх) стеклянную трубку 1 (рис. 6.13), внутри которой располагается поплавок 2. Поплавки могут иметь различную форму. Одна из форм – цилиндрическая с нижней конической частью и верхним бортиком с вырезанными на нем косыми канавками. Контролируемая среда при протекании через эти канавки обеспечивает вращение поплавка, при этом он центрируется по оси трубки и устраняется его трение о стенки.

Между бортиком поплавка и стенкой трубки образуется кольцевой зазор f_k , при прохождении через который поток сужается, скорость его растет, и возникает разность между давлением p_1 в сечении AA до начала сужения и давлением p_2 в самом узком сечении BB кольцевой струи. С подъемом поплавка площадь f_k увеличивается. Принцип действия ротаметра основан на уравновешивании при любом расходе силы тяжести поплавка силами, действующими на него со стороны жидкости. При этом вертикальное положение поплавка будет однозначно связано с расходом.

Основная погрешность ротаметров обычно равна $\pm(2...3) \%$, при индивидуальной градуировке она может быть уменьшена до $\pm(0,5... 1) \%$.

Обычно нижний предел измеряемого расхода ротаметра составляет 0,1 от верхнего предела. Важным отличием ротаметров от других типов расходомеров является незначительная и почти постоянная в рабочем диапазоне потеря давления. У стандартных расходомеров она не превышает 10 кПа для жидкостных приборов и 5 кПа для газовых.

Ротаметры выпускаются нескольких типов. Стеклянные показывающие ротаметры типа РМ имеют шкалу, нанесенную на наружную поверхность конической стеклянной трубки. Шкалы могут градуироваться в различных единицах: в единицах расхода, в процентах от максимального деления, в миллиметрах, в долях отношений диаметра трубки к диаметру поплавка. Очевидно, что в последних случаях ротаметр снабжается градуировочной характеристикой.

Показания считываются по положению верхней горизонтальной плоскости поплавка. Ротаметры со стеклянной конической трубкой применяются для измерения расхода газов или прозрачных жидкостей, находящихся под давлением не более 0,6 МПа (6 кгс/см²). Для измерения расхода сред с избыточным давлением до 6,4 МПа (64 кгс/см²) используются ротаметры с металлической конической трубкой.

Тахометрические счетчики и расходомеры

Тахометрическими называются расходомеры, в которых скорость движения рабочего тела пропорциональна объемному расходу измеряемой среды. В большинстве случаев рабочее тело – преобразователь расхода (крыльчатка, турбинка, шарик и т.п.) – под воздействием потока вращается. В зависимости от устройства рабочего тела тахометрические расходомеры подразделяются на **крыльчатые, турбинные, шариковые, камерные, кольцевые** и др.

Тахометрические преобразователи расхода могут использоваться как в счетчиках количества, так и в расходомерах. В первом случае преобразователь расхода (например, турбинка) связан со счетным механизмом. Тахометрические расходомеры содержат электрические тахометрические преобразователи частоты вращения чувствительного элемента в электрический сигнал, измеряемый затем вторичным прибором. Электрические преобразователи скорости оказывают незначительное тормозящее действие на подвижный элемент (по сравнению с механической передачей в счетчиках), в силу чего точность тахометрических расходомеров выше точности счетчиков с механическим редуктором. Тахометрические приборы измеряют объемные расходы. При необходимости измерения массовых расходов они должны снабжаться либо измерителями температуры и давления, либо плотномерами, вычислительными устройствами.

Тахометрические расходомеры применяются для измерения расхода различных жидкостей (реже газов), причем некоторые их разновидности могут использоваться на загрязненных жидкостях. Наиболее широко эти расходомеры используются в коммунальном хозяйстве для учета индивидуального

потребления горячей и холодной воды, газа.

Тахометрические расходомеры обладают следующими положительными чертами: широкий динамический диапазон, достигающий 25; высокая точность, получаемая за счет индивидуальной градуировки приборов; простота получения и съема показаний. К числу их недостатков относятся значительная потеря давления, требования к длинам линейных участков до (свыше $10D$) и после (более $3D$) счетчика, износ подшипников при наличии загрязнений в воде и газах, ограничения по диаметру трубопровода.

Тахометрические расходомеры разных типов: для горячей и холодной воды, нефтепродуктов, газа выпускаются многими отечественными и зарубежными фирмами и заводами: з-дом «Водоприбор», «Ценнер водоприбор», «Тепловономер», «Саяны» (Москва), «Промприбор» (г. Ливны), Арзамасским приборостроительным заводом, «Промприбор» (г. Ивано-Франковск), концерном АВВ, фирмами Siemens, Invensys Metering Systems, Brooks Instrument и др.

Крыльчатые и турбинные расходомеры применяются для измерения расхода различных жидкостей за исключением очень вязких и загрязненных, поскольку для них важной является смазывающая способность измеряемой среды. Для измерения расхода газа турбинные расходомеры применяются реже. Это связано с тем, что из-за малой плотности газа достаточно большой вращающий момент получается только при больших расходах, что уменьшает диапазон измерения расходомера и повышает порог чувствительности. Кроме того, в газовой среде ускоряется износ подшипников.

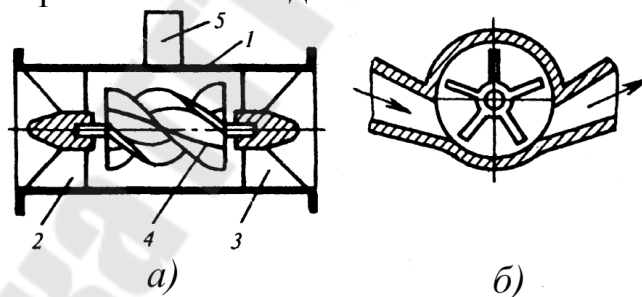


Рис. 6.14 Устройство турбинных преобразователей расхода:
а – четырехлопастная турбина ; б – турбина одноструйных водосчетчиков;
1 – корпус; 2,3 – струевыпрямители; 4 – турбинка; 5 – тахометрический преобразователь

При диаметрах трубопроводов от 15 до 40 мм применяются крыльчатые расходомеры, а от 50 до 250 мм – турбинные. На рис. 6.14а схематично показано устройство турбинного преобразователя расхода жидкости. Корпус преобразователя 1 представляет собой отрезок трубы с двумя фланцами для присоединения его к трубопроводу. Внутри корпуса установлены струевыпрямители 2 и 3, соединенные осью, на которой расположена турбинка 4. В расходомерах частота вращения турбинки, пропорциональная объемному расходу, с помощью тахометрического преобразователя 5 преобразуется в частоту импульсов выходного сигнала. При известной цене импульса их

суммарное число определяет объемный расход на интервале времени. Импульсный сигнал с помощью специальной схемы преобразуется в аналоговый выходной сигнал. В счетчиках количества число оборотов турбины, пропорциональное количеству протекшего вещества, измеряется счетным механизмом, соединенным с осью турбинки шестеренчатым редуктором и магнитной муфтой. Если редуктор находится в воде, то счетчик называется **мокроходным**, если редуктор вынесен из воды, то счетчик является **судоходным**. В основном используются последние. Счетчики могут давать импульсный сигнал, пропорциональный числу оборотов, для чего на стрелке отсчетного устройства устанавливается постоянный магнит, который вызывает срабатывание герконового реле. Цена импульса зависит от того, на стрелке какой декады счетчика установлен магнит.

Турбинки тахометрических расходомеров подразделяются на **аксиальные** и **тангенциальные**. У первых – ось совпадает с направлением потока, у вторых – она перпендикулярна потоку.

Аксиальные турбины имеют лопасти винтовой формы (рис. 6.14а). При малом диаметре турбинок число лопастей мало (4-6), но они имеют большую длину. При больших диаметрах турбины число лопастей велико (до 20), но их высота и длина невелики (относительно диаметра).

Конструкции тангенциальных турбинок разнообразны. В качестве примера на рис. 6.14б показана турбинка серийно выпускаемых одноструйных водосчетчиков.

Шариковыми называются тахометрические расходомеры, подвижным элементом которых служит шарик, непрерывно движущийся в одной плоскости по внутренней поверхности трубы под воздействием предварительно закрученного потока. Скорость движения шарика по окружности трубы пропорциональна объемному расходу жидкости. Схема шарикового преобразователя для средних и больших расходов представлена на рис. 6.15а. Поток жидкости, закрученный формирователем 1 в винтовом направлении, вызывает движение шарика 2 по окружности. От перемещения вдоль трубы шарик удерживается ограничительным кольцом 3, за которым располагается струевыпрямитель 4 для выпрямления закрученного потока. На внешней стороне немагнитного корпуса располагается тахометрический преобразователь 5 для преобразования частоты вращения шарика в частотный электрический сигнал.

Для небольших расходов применяется конструкция, представленная на рис. 6.15б. Здесь нет специального формирователя для закручивания потока, а движение шарика по окружности вызывается тангенциальным подводом жидкости. В шариковых расходомерах применяются тахометрические преобразователи скорости, аналогичные преобразователям турбинных расходомеров. Шар под действием центробежной силы прижимается к внутренней поверхности трубы, а под действием осевой составляющей скорости потока – к ограничительному кольцу, т.е. шару, кроме сил вязкого

трения жидкости, необходимо преодолевать силы трения о поверхности трубы и ограничительного кольца (см. рис. 6.15а).

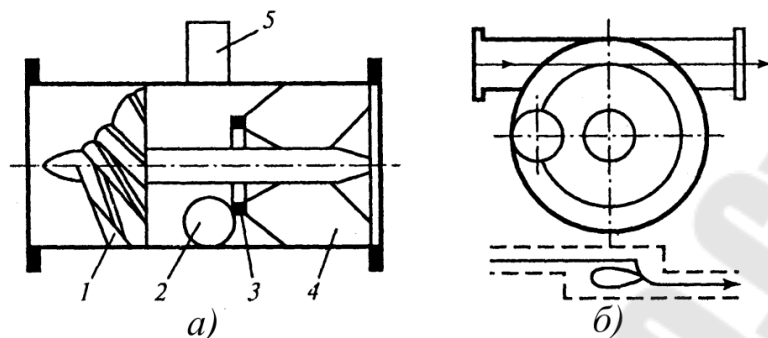


Рис. 6.15 Схема шариковых преобразователей расхода:
 а, б — для больших и малых расходов; 1 — формирователь потока; 2 — шарик;
 3 — ограничительное кольцо; 4 — струевыпрямитель; 5 — тахометрический преобразователь

Камерными называются тахометрические расходомеры и счетчики, имеющие один или несколько подвижных элементов, которые при движении отмеривают определенные объемы жидкости. Обычно эти подвижные элементы движутся непрерывно со скоростью, пропорциональной объемному расходу. В промышленности в большинстве случаев для измерения расхода газа и нефтепродуктов применяются камерные счетчики. Достоинствами их является высокая точность измерения, составляющая $\pm (0,2...1) \%$ для жидкостей и $\pm (1...1,5) \%$ для газов, достаточно большой диапазон измерения и слабое влияние вязкости среды. Последнее обстоятельство позволяет применять камерные счетчики для жидкостей вязкостью до $3 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$.

Один из приборов камерного типа — счетчик жидкости с овальными шестернями. Такой счетчик предназначен для измерения количества жидкостей, имеющих вязкость от $55 \cdot 10^{-6}$ до $3 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$ (0,55...300 сСт), температуру от -40 до $120 \text{ }^\circ\text{C}$ и давление до $64 \text{ кгс}/\text{см}^2$ в трубах диаметром до 100 мм. Такой счетчик имеет основную погрешность $\pm 0,5 \%$. Схема преобразователя с овальными шестернями показана на рис. 6.16.

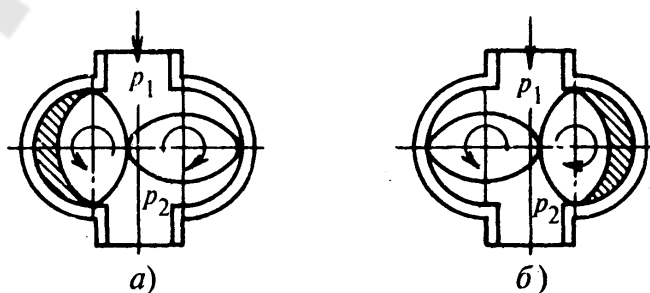


Рис. 6.16 Схема счетчика с овальными шестернями

В положении шестерен по рис. 6.16а под действием разности давлений $P_1 - P_2$ возникает момент, вращающий левую шестерню против часовой стрелки. При этом правая шестерня будет ведомой и за счет зубчатого сцепления будет поворачиваться по часовой стрелке. Через половину оборота шестерни установятся в положение рис. 6.16б. Тогда вращающий момент будет создаваться на правой шестерне, левая становится ведомой. За полный оборот измерительные камеры (на рис. 6.16 заштрихованы) дважды наполняются и опорожняются, т.е. за один оборот объем пропускаемой жидкости равен четырем объемам одной измерительной камеры. На счетный механизм передается движение одной из шестерен посредством магнитной муфты или тахометрического дифференциально-трансформаторного преобразователя скорости. Измерение вязкости жидкости может увеличить погрешность счетчика.

Электромагнитные расходомеры

Принцип действия электромагнитных расходомеров основан на законе электромагнитной индукции, в соответствии с которым в электропроводной жидкости, пересекающей магнитное поле, индуцируется ЭДС, пропорциональная скорости движения жидкости. Серийные электромагнитные расходомеры предназначены для измерения расхода жидкостей с электропроводностью не менее 10^{-3} См/м (соответствует электропроводности водопроводной воды). Имеются специальные расходомеры, позволяющие измерять расход жидкостей с электропроводностью до 10^{-5} См/м. В настоящее время электромагнитные расходомеры – это самые распространенные приборы для измерения расхода воды в трубопроводах диаметром менее 250 мм. Что объясняется их следующими положительными чертами:

- показания не зависят от вязкости и плотности среды;
- динамический диапазон достигает 100 и более;
- преобразователи расхода являются безынерционными;
- они не имеют частей, выступающих внутрь трубы, и, таким образом, не создают потери давления;
- влияние местных сопротивлений значительно меньше, чем у других расходомеров, поэтому требуемая длина прямых участков для них минимальная;
- электромагнитные расходомеры применяются на трубопроводах диаметром от 2 до 4000 мм;
- электромагнитные расходомеры могут быть использованы в ряде случаев, когда применение расходомеров других типов затруднено или невозможно вовсе: при измерении расхода агрессивных, абразивных и вязких жидкостей, пульпы, жидких металлов.

К числу недостатков электромагнитных расходомеров следует отнести требования к минимальному значению электропроводности измеряемой среды, что сужает круг использования таких расходомеров. Другой недостаток

расходомеров – низкий уровень информативного сигнала (мкВ) и необходимость тщательной защиты преобразователя и линий связи от внешних помех.

Отечественными и зарубежными фирмами выпускается широкий спектр микропроцессорных электромагнитных расходомеров: МР400 (ф. «Взлет»), ИПРЭ-1 (Арзамасский приборостроит. з-д), РМ-5 (ф. «ТБН»), РОСТ 13, ТРЭМ-ПР (з-д «Молния»), ВИС. Т (ф. «Тепловизор»), РСМ-05 (ф. «ТЭМ-прибор»), VA 2305 (ф. Aswega), Magne W 3000 PLUS (ф. Honeywell), ИМТ96 (ф. Foxboro), ADMAD (ф. Yokogawa), SITRANS FM (ф. Siemens) и др. Принципиальная схема первичного преобразователя электромагнитного расходомера показана на рис. 6.17а. Рабочий участок трубы преобразователя 1, изготовленный из немагнитного материала и покрытый изнутри электрической изоляцией 2 (резиной, эмалью, фторопластом и т.п.), расположен между полюсами электромагнита. Через стенку трубы изолированно от нее по диаметру введены электроды 3, находящиеся в электрическом контакте с жидкостью. Силовые линии магнитного поля направлены перпендикулярно плоскости, проходящей через ось трубы и линию электродов.

В качестве примера на рис. 6.17б представлена схема электромагнитного преобразователя скорости с цилиндрическим магнитом. Основными элементами преобразователя являются обтекаемый корпус 7, магнит 2 в форме цилиндра и электроды 3. В простейшем случае электроды привариваются к внутренней поверхности корпуса в диаметрально противоположных точках и выводятся из корпуса с помощью кабеля 4. При обтекании преобразователя жидким металлом между электродами появляется разность потенциалов, пропорциональная скорости металла.

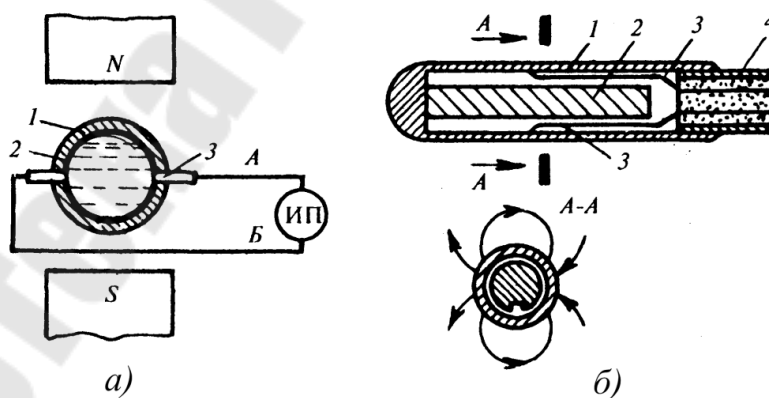


Рис. 6.17 Схема преобразователей электромагнитных расходомеров:
 а – с внешним магнитом: 1 – преобразователь; 2 – электрическая изоляция; 3 – электроды; б – с внутренним магнитом; 1 – обтекаемый корпус; 2 – магнит; 3 – электроды; 4 – кабель

6.2.3 Ультразвуковые, вихревые и массовые расходомеры. Тепло-счетчики

Ультразвуковые расходомеры

Принцип действия ультразвуковых расходомеров основан на измерении зависящего от расхода того или иного акустического эффекта, возникающего при прохождении ультразвуковых колебаний через контролируемый поток жидкости или газа.

В последнее время используются две разновидности ультразвуковых расходомеров: **расходомеры, основанные на перемещении ультразвуковых колебаний движущейся средой и доплеровский**. Наибольшее распространение получила первая группа приборов. В таких расходомерах ультразвуковые колебания, создаваемые пьезоэлементами, направляются по потоку жидкости и против него. Разность времен прохождения Δt ультразвуковыми импульсами расстояния между излучателем и приемником по потоку и против потока пропорциональна скорости потока, т.е. скорость ультразвука относительно стенок трубы зависит от скорости потока.

Основные трудности использования ультразвукового метода связаны с тем, что скорость ультразвука в среде зависит от физико-химических свойств последней: температуры, давления, и она значительно больше скорости среды, так что действительная скорость ультразвука в движущейся среде мало отличается от скорости в неподвижной среде. Разность времен прохождения Δt равна $10^{-6} \dots 10^{-7}$ с даже при скоростях потока 10...15 м/с, причем измерять Δt нужно с погрешностью $10^{-8} \dots 10^{-9}$ с. Эти обстоятельства обуславливают необходимость применения сложных электронных схем в сочетании с микропроцессорной техникой, обеспечивающих компенсацию влияния перечисленных факторов.

Ультразвуковые расходомеры в последние годы получают все более широкое распространение благодаря следующим положительным чертам:

- значительному динамическому диапазону, достигающему 25-30;
- высокой точности измерения, составляющей $\pm(1;2) \%$;
- возможности измерения расхода неэлектропроводных сред (нефтепродукты), загрязненных сред, суспензий;
- широкому диапазону диаметров трубопроводов от 10 мм и выше без ограничений;
- малой инерционности;
- отсутствию потери давления;
- широкому диапазону температур (от -220 до 600 °С) и давлений.

К недостаткам этого метода измерения расхода следует отнести:

- необходимость значительных длин линейных участков до и после преобразователя;
- влияние на показания пузырьков воздуха в потоке;
- необходимость контроля отложений в трубопроводе на его рабочем участке;
- сложность и высокая стоимость приборов, которая при прочих равных условиях в 3-4 раза превышает стоимость тахометрических и электромагнит-

ных расходомеров;

- ограничения по минимальной скорости потока.

Все ультразвуковые расходомеры являются микропроцессорными, на выходе они имеют токовый и импульсный выходные сигналы, цифровой дисплей, интерфейсы RS-232, RS-485, цепь сигнализации, значение суммарного расхода архивируется вместе с указанием нештатных ситуаций. Многие приборы могут измерять расход реверсивного потока.

Расходомеры по конструктивному исполнению подразделяются на **одно-** и **двухканальные**. В одноканальной схеме (рис. 6.18а) каждый пьезоэлемент работает попеременно в режиме излучателя и приемника, что обеспечивается системой переключателей. Для увеличения чувствительности ход луча в среде может быть увеличен применением рефлекторов (рис. 6.18б). Чувствительность ультразвуковых преобразователей также растет с уменьшением угла α между векторами скорости потока u и ультразвука c . В двухканальной схеме (рис. 6.18в) каждый пьезоэлемент работает только в одном режиме – излучателя или приемника. Двухканальные схемы проще одноканальных (нет сложных схем переключения), но точность их меньше, вследствие возможной акустической асимметрии обоих каналов.

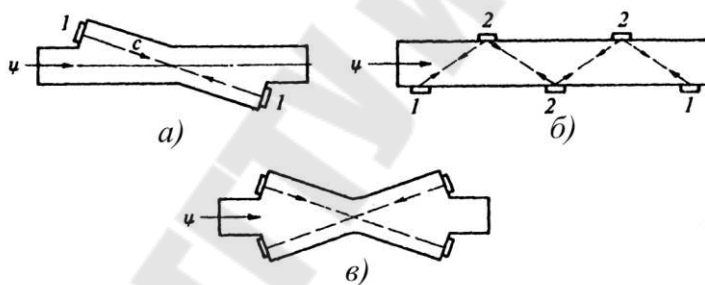


Рис. 6.18 Схемы ультразвуковых преобразователей расходомеров:
а – одноканального; б – с отражателями; в – двухканального

Вихревые и массовые расходомеры

В **вихревых расходомерах** значение расхода определяется по частоте вихрей Кармана, возникающих как при введении в поток тела обтекания, так и при специальном закручивании потока. К достоинствам этого метода можно отнести:

- возможность измерения расхода жидких и газовых сред;
- отсутствие движущихся элементов в потоке и простота устройства;
- широкий динамический диапазон, достигающий 25;
- широкий диапазон давлений и температур измеряемых сред;
- высокая точность.

К недостаткам этого метода относятся:

- ограничения по диаметру трубопровода $D=(20...150)$ мм;
- ограничения по вязкости, которая не должна превышать $5 \cdot 10^{-5}$ м²/с;

- для обеспечения устойчивого вихреобразования скорость потока должна быть не менее 0,2 м/с;
- наличие потери давления, достигающей 30 кПа;
- воздействие на преобразователь акустических и вибрационных помех, создаваемых насосами, компрессорами, местными сопротивлениями. Для снижения влияния последних необходимо обеспечить определенную длину линейных участков до и после вихревого преобразователя.

Наибольшее распространение получили вихревые расходомеры с телом обтекания, которое находится на пути потока и изменяет направление движения омывающих его струй. Характер движения потока при обтекании цилиндра и образование вихрей представлены на рис. 6.19. При обтекании цилиндра скорость потока возрастает, кинетическая энергия растет, а потенциальная падает. После минимального сечения, где площадь минимальная, поток расширяется, скорость его снижается и давление растет. Под влиянием возрастающего давления пограничный слой начинает отклоняться в область мертвой зоны, создавая встречный потоку свертывающийся вихрь. Развитие вихря с одной стороны препятствует образованию вихря с другой, поэтому создаются две вихревые дорожки с шахматным расположением вихрей в них.

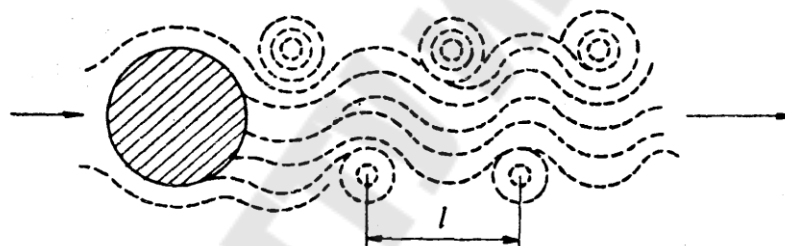


Рис. 6.19 Схема образования вихрей Кармана

Теплосчетчики

Теплосчетчик – средство измерения, предназначенное для определения количества теплоты. Количество теплоты обычно выражается в гигаджоулях (ГДж) или гигакалориях (Гкал), $1 \text{ Гкал} = 4,1868 \text{ ГДж}$.

Теплосчетчики получили широкое распространение, поскольку по их показаниям производятся расчеты за полученную потребителями теплоту. Теплосчетчики устанавливаются как на источниках теплоты: ТЭЦ, РТС (районные тепловые станции), так и у потребителей, теплоносителем служит вода, редко – пар. Все выпускаемые в настоящее время теплосчетчики являются многофункциональными микропроцессорными приборами, включающими в свой состав измерители температуры, расхода, давления и тепловычислители. Они имеют защиту от несанкционированного доступа, а используемые в них программы и заложенные функциональные возможности исходят из действующих правил как учета теплоты и теплоносителя, так и теплоснабжения.

6.3 Измерение влажности

Влажность газов, твердых и сыпучих тел, жидких сред является одним из важных показателей целого ряда технологических процессов в металлургической, химической, пищевой, текстильной, строительной и других отраслях промышленности. Кроме того, измерение расхода отпущенного и полученного потребителями топливного газа сопровождается контролем его влажности.

Влажность воздуха и газов при технических измерениях может быть охарактеризована следующими параметрами:

- **абсолютной влажностью**, определяемой количеством водяного пара, содержащегося в единице объема газа, г/м³;
- **влажностью** – массой водяного пара, отнесенной к массе сухого газа, г/кг;
- **температурой точки росы** – температурой, при которой газ становится насыщенным содержащимся в нем водяным паром, °С;
- **относительной влажностью**, определяемой отношением абсолютной влажности к максимально возможной влажности этого газа при данной температуре, %.

Влажность твердых и сыпучих тел может быть охарактеризована следующими параметрами:

- влажностью – отношением массы влаги к массе абсолютно сухого тела;
- влажностью – отношением массы влаги к массе влажного тела.

Часто эти величины выражаются в процентах.

6.3.1 Методы измерения влажности воздуха и газа

В настоящее время наибольшее распространение в промышленных приборах получили следующие методы измерения влажности газов и воздуха: психрометрический, точки росы, сорбционный и оптический.

Психрометрический метод измерения влажности основан на измерении психрометрической разности температур между «сухим» и «мокрым» термометрами. Мокрый термометр смачивается через специальный фитиль водой. Испарение, а следовательно, и охлаждение с поверхности мокрого термометра тем больше, чем ниже влажность газа. Поэтому разность температур сухого и мокрого термометров зависит от влажности газа.

Метод точки росы основан на определении температуры, при которой газ становится насыщенным находящейся в нем влагой. Эта температура определяется по началу конденсации водяного пара на зеркальной поверхности, температура которой может устанавливаться любой в интервале температур работы влагомера.

Сорбционный метод основан на связи физических свойств гигроскопических веществ с количеством поглощенной ими влаги, зависящей от влажности анализируемого газа.

Оптический метод основан на измерении ослабления инфракрасного (ИК)

излучения за счет его поглощения парами воды.

Психрометрический метод

В психрометрическом методе используется зависимость между парциальным давлением пара в парогазовой смеси и показаниями сухого и мокрого термометров:

$$p_{н.м} - p = A p_{\sigma} (t_c - t_m), \quad (6.10)$$

где p – парциальное давление пара в парогазовой смеси;

$p_{н.м}$ – парциальное давление насыщенного пара при температуре мокрого термометра t_m ;

p_{σ} – барометрическое давление;

A – психрометрическая постоянная;

t_c – температура сухого термометра.

Относительная влажность ϕ может быть определена из (6.10) следующим образом:

$$\phi = p / p_{н.с} \cdot 100 = 100 [p_{н.м} - A p_{\sigma} (t_c - t_m)] / p_{н.с}, \quad (6.11)$$

где $p_{н.с}$, $p_{н.м}$ – парциальное давление насыщенного пара при температурах t_c и t_m .

В связи с тем, что $p_{н.с}$ и $p_{н.м}$, однозначно определяются t_c и t_m , то при $A = \text{const}$, можно получить зависимость

$$\phi = f(t_c - t_m, t_c) \quad (6.12)$$

По этой зависимости можно составить психрометрические таблицы. Таблицы могут быть различными для разных конструкций мокрого термометра. Психрометрическая постоянная A определяется условиями теплоотвода от термометра через фитиль в окружающую среду (размерами и формой резервуара или гильзы термометра, теплопроводностью гильзы и ткани фитиля, смоченностью ткани и другими факторами), поэтому практически для каждой новой конструкции A будет отличным от других.

Шкала психрометра градуируется в процентах относительной влажности. Возможны различные модификации этой схемы, но, как правило, принцип действия остается неизменным.

Преимущества психрометрического метода – достаточно высокая точность и чувствительность при температурах выше 0°C . К недостаткам метода относится уменьшение чувствительности и точности при низких температурах, а также погрешность, связанная с непостоянством психрометрической постоянной A .

Метод точки росы

По температуре точки росы можно определить абсолютную влажность или влагосодержание, а если дополнительно измерить температуру газа, то

можно определить и относительную влажность. Этот метод один из наиболее точных и позволяет производить измерение влажности при любых давлениях газа как при положительных, так и при отрицательных температурах. Основным чувствительным элементом влагомеров, основанных на измерении температуры точки росы, является зеркало, обдуваемое анализируемым газом. Зеркало необходимо охлаждать, чтобы на нем происходила конденсация влаги, находящейся в анализируемом газе. Одновременно фиксируется температура, при которой начинается выпадение влаги (росы).

Для технических измерений разработаны автоматические влагомеры точки росы. Одна из схем такого влагомера представлена на рис. 6.20.

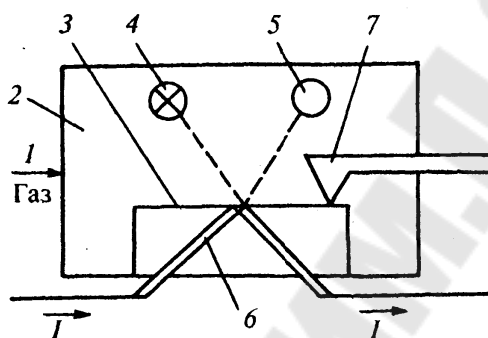


Рис. 6.20 Принципиальная схема влагомера точки росы:

1 – канал; 2 – камера; 3 – зеркальная поверхность; 4 – источник измерения; 5 – оптрон; 6 – термобатарея; 7 – термопара

Газ, очищенный от примесей и пыли, по каналу 1 поступает в камеру 2, где соприкасается с зеркальной поверхностью оптического канала 3 по которому световой поток от источника 4 попадает на оптрон 5. Поверхность 3 охлаждается термобатареей 6, работающей на эффекте Пельтье. Принцип ее работы состоит в том, что при прохождении тока через соприкасающиеся поверхности разнородных проводников в зависимости от направления тока поглощается или выделяется тепло. Так, снижение температуры на $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ может быть получено при пропускании тока в 6 А при напряжении питания 15 В через термоэлектронную батарею размером $40\times 40\times 40$ мм, содержащую 127 элементов. При достижении точки росы на поверхность 3 выпадает роса, оптрон запирается и ток через термобатарею 6 прекращается. Термопара 7 фиксирует температуру выпадения росы. Преобразователь точки росы прибора «КОНГ-Прима» измеряет точку росы в диапазоне $-30\dots 30\text{ }^{\circ}\text{C}$, погрешность составляет $\pm 0,25$ и $\pm 1\%$.

При практической реализации метода точки росы существуют определенные трудности. Во-первых, фиксация самого момента начала конденсации (выпадения росы) зависит от метода фиксации (оптический, кондуктометрический и т.д.). Во-вторых, температура точки росы может зависеть от состояния поверхности, на которой происходит конденсация. Например, наличие жира или нефтепродуктов на поверхности конденсации существенно занижает температуру точки росы. В-третьих, при измерении влажности агрессивных газов

температуры точки росы могут существенно отличаться от расчетных. Кроме того, агрессивные газы вызывают коррозию поверхности, на которой происходит конденсация.

Сорбционные влагомеры

В сорбционных влагомерах чувствительный элемент должен находиться в гигрометрическом равновесии с измеряемым газом. В практике технических измерений получили распространение следующие разновидности сорбционных преобразователей: **электролитические, кулонометрические, пьезосорбционные и деформационные.**

В электролитических гигрометрах измерительный преобразователь включает влажочувствительный элемент, содержащий электролит. Изменение влажности газа вызывает изменение количества влаги, содержащейся во влажочувствительном элементе, что приводит к изменению концентрации электролита во влажочувствительном элементе и соответствующему изменению его сопротивления или емкости. В качестве электролита чаще всего применяют хлористый литий. Измерительные схемы электролитических гигрометров представляют собой различные варианты мостовых измерительных схем. К недостаткам электролитических гигрометров следует отнести нестабильность их градуировочных характеристик, а также влияние температуры и концентрации растворенного вещества на их показания.

В кулонометрических преобразователях влажность газа определяют по количеству электричества, затраченного на электролиз влаги, которая поглощается частично гидротированным пентаоксидом фосфора. Измерительный преобразователь в этих приборах состоит из пластмассового корпуса, во внутреннем канале которого расположены два электрода в виде несоприкасающихся спиралей. Пространство между электродами заполнено частично гидратированным пентаоксидом фосфора, являющимся хорошим осушителем. Влага газа, соединяясь с гигроскопическим веществом, образует раствор фосфорной кислоты с большой удельной проводимостью. Подключенное к электродам постоянное напряжение вызывает электролиз поглощенной влаги. Количество поглощенной и разложенной воды при постоянном расходе газа одинаково и определяется концентрацией влаги в анализируемом газе.

Преимуществом кулонометрических гигрометров является независимость их показаний от напряжения питания и состава газа. Загрязнения сорбента практически не влияют на показания прибора, метод не требует градуировки на эталонных смесях и хорош для измерения микроконцентраций влаги в газах.

К недостаткам метода относится необходимость исключения паров и газов, имеющих щелочную реакцию (аммиак, амины). Их присутствие выводит из строя чувствительный элемент. На показания существенно влияют пары спиртов, которые гидролизуются на пентаоксиде фосфора с образованием воды.

В пьезосорбционных гигрометрах используется зависимость частоты собственных колебаний кварцевого резонатора от массы влаги, поглощенной сорбентом, нанесенным на поверхность кварцевой пластины. Изменение массы

вещества на кварцевой пластине Δm и частоты собственных колебаний связаны выражением

$$\Delta f = \Delta m f^2 / (N \rho S) \quad (6.13)$$

где ρ , S – плотность и площадь пластины кварца;
 N – частотный коэффициент.

Метрологические характеристики пьезосорбционных гигрометров определяются материалом сорбента и технологией его нанесения на поверхность кварцевой пластины. Применение в качестве сорбентов силикагеля, цеолитов, сульфированного полистирола позволяет использовать пьезосорбционный метод для измерения микроконцентраций влаги в газах. Конструкция чувствительного элемента прибора достаточно проста.

Пьезосорбционные гигрометры требуют градуировки по газовым смесям с известной влажностью. Возможны дополнительные погрешности за счет сорбирования помимо влаги других примесей анализируемого газа. Пьезосорбционные гигрометры применяются в химической промышленности и при испытаниях материалов и изделий в термокамерах.

6.3.2 Методы измерения влажности твердых и сыпучих тел

Методы измерения влажности твердых и сыпучих тел условно можно разделить на две группы: **прямые методы**, позволяющие определять массу влаги или сухого вещества в пробе; **косвенные методы**, определяющие влажность по параметру, функционально связанному с влажностью. Прямые методы отличаются высокой точностью измерения и большой длительностью (до 10... 15 ч).

Косвенные методы характеризуются высоким быстродействием и значительно меньшей точностью измерения. В технических измерениях применяются исключительно косвенные методы. Из них наибольшее распространение получили электрические методы, такие как кондуктометрический, емкостной и др. Большинство промышленных материалов являются капиллярно-пористыми. В сухом виде они представляют собой диэлектрики с удельным сопротивлением 10^8 Ом·м и выше. При увлажнении капиллярно-пористые тела могут стать проводниками с удельным сопротивлением 10^4 Ом·м.

Степенная зависимость сопротивления от влажности обеспечивает высокую чувствительность **кондуктометрического метода**. Однако его применение ограничено большим числом влияющих величин, таких как температура, структура материала, плотность насыпки, химический состав, наличие электролитов, которые практически позволяют использовать этот метод только в лабораторных условиях.

Емкостный метод основан на том, что изменение влажности капиллярно-пористых тел приводит к существенному изменению их диэлектрической проницаемости. У сухих тел диэлектрическая проницаемость $\epsilon = 1...6$, а у воды

$\varepsilon = 81$. Изменение диэлектрической проницаемости вследствие изменения влажности материала определяют по изменению емкости конденсатора, между обкладками которого помещается анализируемый материал. Преобразователь емкостного влагомера выполняют в виде двух плоских пластин или двух концентрических цилиндров, пространство между которыми заполняется анализируемым материалом с помощью засыпки при падении материала с определенной высоты. В этом случае обеспечивается хорошая воспроизводимость результатов измерения. Емкость конденсатора определенных геометрических размеров может быть выражена формулой

$$C = k\varepsilon \quad (6.14)$$

где ε – диэлектрическая проницаемость материала, определяемая его влажностью;

k – постоянная, определяемая геометрическими размерами и формой конденсатора.

6.4 Анализ состава газов

Средства измерений, применяемые в различных отраслях промышленности, научных исследованиях для анализа состава газов, называются **газоанализаторами**. На основе непрерывного автоматического контроля состава газов осуществляется управление химико-технологическими процессами, связанными с получением и использованием газов в металлургии, коксохимическом производстве, нефтепереработке, газовой промышленности. При сжигании органических топлив на тепловых электрических станциях автоматические газоанализаторы используются для контроля за процессом горения и определения требуемого избытка воздуха. Не менее важные функции возложены на приборы газового анализа, работающие в системах, обеспечивающих безопасное функционирование технологических объектов. К числу таких приборов относятся газоанализаторы, измеряющие концентрацию водорода в системе охлаждения турбогенераторов, в газах сдувок аппаратов с радиоактивным теплоносителем на АЭС и т.п.

В последние годы в связи с усилением внимания к охране окружающей среды расширилось производство и использование газоанализаторов, предназначенных для контроля содержания вредных примесей в газовых выбросах промышленных предприятий и электрических станций, в воздухе производственных помещений и атмосфере. Так, в соответствии с ГОСТ 17.2.3.01-86 для контроля за качеством воздуха населенных пунктов осуществляется периодическое измерение концентрации таких основных загрязняющих веществ, как сернистый газ, оксид углерода, оксид и диоксид азота, пыль.

Для измерения концентрации одного из компонентов газовой смеси используется то или иное физико-химическое свойство этого газа, отличающееся от свойств остальных газов. Чем резче это отличие и чем оно специфичнее, тем

выше чувствительность метода и проще осуществляется подготовка пробы газа. Разнообразие используемых в газоанализаторах методов измерения обусловлено обширностью анализируемых компонентов газовых смесей и широким диапазоном изменения их концентраций.

подавляющее большинство промышленных автоматических газоанализаторов предназначено для измерения концентрации одного компонента в смеси газов. В этом случае смесь газов рассматривается как бинарная, в которой определяемый компонент влияет на измеряемое физико-химическое свойство смеси, а остальные компоненты, независимо от их состава и концентрации, не влияют и считаются вторым компонентом смеси.

Существуют газоанализаторы, предназначенные для анализа различных составляющих многокомпонентных газовых смесей, в большинстве случаев эти приборы используются в лабораторной практике. Газоанализаторы градуируются в % по объему, г/м³, мг/л. Первая единица измерения является более удобной, поскольку процентное содержание компонентов газовой смеси сохраняется при изменении температуры и давления.

Существующая классификация газоанализаторов основывается на физико-химических свойствах, положенных в основу измерения концентрации определяемых компонентов смеси, и включает следующие основные группы приборов: **механические, тепловые, магнитные, оптические, электрические, хроматографические и масспектрометрические.**

Газоанализаторы в отличие от средств измерения температуры, давления представляют собой установки, содержащие кроме измерительного преобразователя (приемника) ряд устройств, обеспечивающих отбор, подготовку и транспортирование пробы газа через прибор. Наиболее распространенные типы этих устройств рассмотрены в конце главы. Для газоанализаторов характерно разделение на две группы приборов. В первую группу входят измерительные приборы, во вторую – индикаторы, сигнализаторы, детекторы утечки газов. Приборы второй группы часто являются переносными, более простыми по конструкции и имеют меньшее число вспомогательных устройств.

6.4.1 Объемные химические газоанализаторы

В механических газоанализаторах измерение содержания определяемых компонентов производится на основании изменения механических параметров состояния или соответствующих свойств газовой смеси. К числу информативных величин в этих приборах относятся изменения объема или давления пробы газовой смеси, ее вязкости, плотности, скорости распространения звука.

Объемные химические газоанализаторы являются наиболее распространенными приборами механического типа (волюмометрические). О содержании в них определяемого компонента судят по изменению объема газовой смеси в результате избирательного поглощения, каталитического окисления или сжигания определяемого компонента. Поскольку для избирательного удаления опре-

деляемых компонентов используются химические реакции, приборы часто называют объемными химическими газоанализаторами. С их помощью можно произвести измерение концентрации в смеси газов следующих компонентов: диоксида углерода, сероводорода, диоксида серы (сумма кислых паров и газов), кислорода, оксида углерода, водорода, непредельных и предельных углеводородов, азота.

При определении содержания CO_2 , SO_2 используется раствор щелочи, при этом протекают следующие реакции:



Для поглощения водорода и оксида углерода используется щелочной раствор полухлористой меди. Кислород поглощается щелочным раствором пирогаллола, а непредельные углеводороды – бромной водой. Водород и предельные углеводороды могут удаляться из смеси сжиганием, а оксид углерода – каталитическим окислением. Погрешность рассматриваемого метода в значительной мере определяется погрешностью измерения изменения объема, поэтому начальный и остаточный объемы пробы газа должны иметь одинаковые температуру и давление. Подавляющее большинство газоанализаторов, основанных на этом принципе измерения, относятся к лабораторным приборам периодического действия, в которых отбор пробы и другие операции выполняются вручную.

Принцип действия объемных химических газоанализаторов рассматривается на примере газоанализатора ГХП-2 (рис. 6.21), предназначенного для измерения двух компонентов газовой смеси: CO_2 и O_2 .

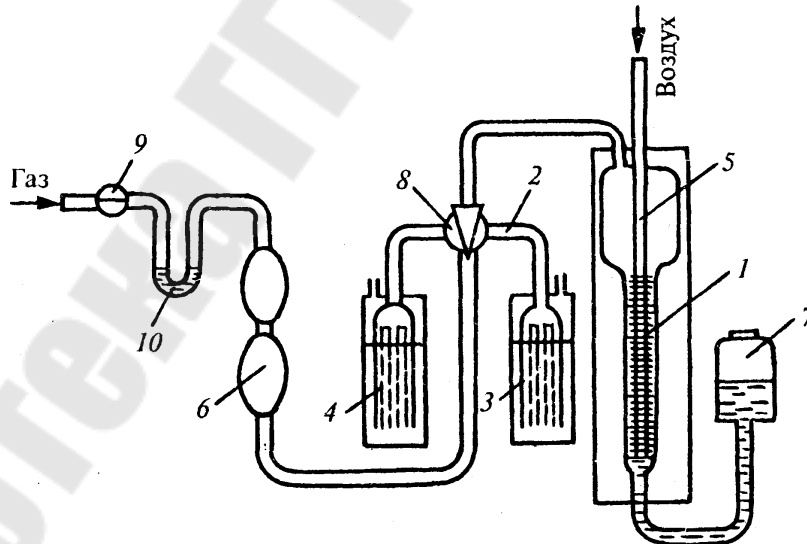


Рис. 6.21 Схема газоанализатора ГХП-2:

- 1 – измерительная бюретка; 2 – гребенка; 3, 4 – поглотительные сосуды; 5 – трубка;
6 – резиновая груша; 7 – напорный сосуд; 8, 9 – краны; 10 – фильтр

Прибор включает в себя измерительную бюретку 1, соединенную с гребенкой 2, к которой подключены два поглотительных сосуда 3, 4. Сосуд 3 за-

полнен раствором едкого калия и предназначен для поглощения CO_2 , сосуд 4 содержит щелочной раствор пирогаллола для поглощения O_2 . Поскольку последний раствор поглощает CO_2 , при проведении анализа вначале определяют содержание CO_2 , а затем кислорода. Внутри мерной бюретки находится сообщающаяся с атмосферой трубка 5, которая используется для контроля давления пробы газа после поглощения определяемого компонента. Мерная бюретка термостатирована. Отбор пробы при открытом кране 9 и прокачивание газа через прибор осуществляются резиновой грушей 6. При прокачивании газа кран 8 находится в положении, показанном на рисунке, напорный сосуд 7 с запирающей жидкостью опущен и газ через трубку 5 выталкивается в атмосферу. При подъеме напорного сосуда 7 запирающая жидкость при достижении конца трубки 5 отсекает от атмосферы пробу газа объемом 50 см^3 . В двух других положениях крана 8 проба газа в мерной бюретке 1 сообщается с сосудами 3 и 4. Фильтр 10 служит для очистки газа.

В качестве запирающей используется жидкость, не поглощающая компоненты анализируемой газовой смеси; часто применяются насыщенные растворы поваренной соли или хлористого кальция.

Цена деления мерной бюретки ГХП-2 составляет 0,1 мл. При предельной погрешности измерения объема $\pm 0,1$ мл погрешность в оценке остаточного объема пробы составляет $\pm 0,2\%$. Невысокая точность оценки изменения объема не позволяет использовать эти газоанализаторы для измерения малых концентраций.

К числу достоинств объемного метода измерения концентраций газов относятся: возможность измерения широкого круга компонентов газовых смесей в результате подбора соответствующих поглотителей или химических реакций связывания; возможность анализа многокомпонентных газовых смесей; простота устройства.

Недостатками метода являются: низкая точность анализа (не выше 0,1...0,2 % общего объема пробы); периодичность действия; необходимость частой замены реактивов; сложность создания на этом принципе автоматических приборов; громоздкость прибора из-за большого числа элементов из стекла.

6.4.2 Тепловые газоанализаторы

В тепловых газоанализаторах измерение концентрации определяемого компонента производится измерением тепловых свойств газовой смеси, зависящих от концентрации определяемого компонента. Наиболее распространенными приборами этого типа являются газоанализаторы, основанные на измерении теплопроводности смеси (**термокондуктометрические**) и теплоты, выделяющейся при реакции каталитического окисления определяемого компонента (**термохимические**). Представители этих групп приборов, как правило, являются автоматическими устройствами, работающими в составе информационно-

измерительных и управляющих систем. Тепловые газоанализаторы предназначены для непрерывного анализа состава бинарных смесей.

Термокондуктометрические газоанализаторы

В табл. 6.1 приведены теплопроводности различных газов при температурах 100 и 500 °С, отнесенных к теплопроводности воздуха. Анализ данных, приведенных в табл. 6.1, показывает, что при температуре 100 °С теплопроводности таких газов, как H_2 , CO_2 , SO_2 , CH_4 , Ar, Ne отличаются от теплопроводности воздуха.

С ростом температуры теплопроводность газов меняется в разной степени, в связи с чем при температуре 500 °С относительная теплопроводность N_2 , H_2 , O_2 , CO, Ar, Ne практически не меняется, тогда как теплопроводность CO_2 возрастает до единицы, а CH_4 – до 2,13. Характер влияния температуры на относительный коэффициент теплопроводности газов учитывается при выборе температурных режимов работы чувствительных элементов газоанализаторов.

Термохимические газоанализаторы

В термохимических газоанализаторах концентрация определяемого компонента измеряется по количеству теплоты, выделившейся при реакции каталитического окисления. В число определяемых по этому методу газов входят CO, H_2 , O_2 , NH_3 , CH_4 . Термохимические газоанализаторы используются как сигнализаторы взрывоопасных концентраций газов, измерителей химического недожога топлива, детекторов газовых хроматографов и пр.

Термохимические газоанализаторы разделяются на две группы. В первой группе, имеющей более низкую чувствительность, реакция окисления происходит на поверхности нагретой платиновой нити, играющей роль катализатора. Температура платиновой нити, а следовательно, и ее сопротивление меняются с изменением количества теплоты, выделившейся при окислении определяемого компонента.

Газоанализаторы первой группы в основном используются как индикаторы и сигнализаторы взрывоопасных концентраций газов и выполняются в переносном варианте, к их числу относятся сигнализаторы СГГ до взрывоопасных концентраций в воздухе таких газов как водород, метан, пропан и др. Сигнализаторы градуируются в процентах нижнего концентрационного предела взрываемости (НКПВ).

В термохимических газоанализаторах второй группы реакция окисления определяемого компонента протекает на поверхности гранулированного катализатора, в качестве которого часто используется гопкалит (60% диоксида марганца и 40 % оксида меди). Наличие развитой поверхности катализатора обеспечивает возможность измерения концентраций определяемого компонента, составляющих доли процента. Количество выделившейся при сжигании теплоты измеряется платиновым терморезистором или батареей термопар.

6.4.3 Магнитные газоанализаторы

В магнитных газоанализаторах, относящихся к анализаторам бинарных смесей, концентрация определяемого компонента измеряется по изменению магнитных свойств газовой смеси. Газы по их магнитной восприимчивости делятся на парамагнитные, втягиваемые в магнитное поле, и диамагнитные, выталкиваемые из него. Наибольшей магнитной восприимчивостью обладает кислород, относящийся к парамагнитным газам. Газы, кроме кислорода, окиси и диоксида азота, являются практически немагнитными, поскольку их объемная магнитная восприимчивость на два порядка ниже, чем у кислорода. Таким образом, магнитные свойства газовой смеси определяются концентрацией кислорода, поскольку NO и NO₂, являющиеся продуктами высокотемпературных окислительных реакций, встречаются в малых концентрациях.

Существует несколько методов измерения магнитной восприимчивости смеси газов, наиболее распространенный из них связан с использованием явления термомагнитной конвекции. Последняя представляет собой движение кислородосодержащего газа в неоднородном магнитном и тепловом полях. Основанные на этом эффекте газоанализаторы выполняются с одностовой или двухмостовой измерительными схемами.

В газоанализаторах МН используется двухмостовая измерительная схема, представленная на рис. 6.22. В первичном преобразователе (приемнике) размещены два моста, питаемых от вторичных обмоток 1, 2 силового трансформатора Тр. Мост I является рабочим, его резисторы R_1 , R_2 , представляющие собой платиновые чувствительные элементы с внешним теплообменом, омываются анализируемым газом. Резистор находится в неоднородном магнитном поле, R_2 – между полюсами ложного магнита (медного блока). Резисторы R_3 , R_4 являются постоянными и выполнены из манганиновой проволоки.

При наличии кислорода в смеси газов мост I работает в неравновесном режиме и напряжение в измерительной диагонали U_{ab} зависит от концентрации кислорода. Для проверки начальной точки шкалы вторичного прибора приемник снабжается металлическим шунтом. При его опускании снимается магнитное поле, резисторы R_1 и R_2 попадают в одинаковые условия и мост I должен быть уравновешен.

Мост II является мостом сравнения. Его плечи R_5 и R_6 , выполненные из платиновой проволоки, омываются воздухом, причем R_6 , как и R_2 находится между полюсами ложного магнита. Резисторы R_7 и R_8 выполнены подобно R_3 и R_4 из манганиновой проволоки. Поскольку концентрация кислорода в воздухе является стабильной, мост II развивает постоянный сигнал небаланса U_{bd} . Колебания U_{bd} обусловлены только отклонениями напряжения питания, температуры и давления окружающей среды.

Для измерения сигнала рабочего моста используется компенсационный метод, причем сигналом компенсации служит доля напряжения небаланса моста сравнения U_{bd} , снимаемая с реохорда, $U_{bc} = \alpha U_{bd}$ где α изменяется от 0 до 1. Компенсация сигнала рабочего моста долей сигнала моста сравнения осуществляется автоматически, в качестве вторичного прибора используется автоматический уравновешенный мост с некоторыми изменениями в измерительной схеме

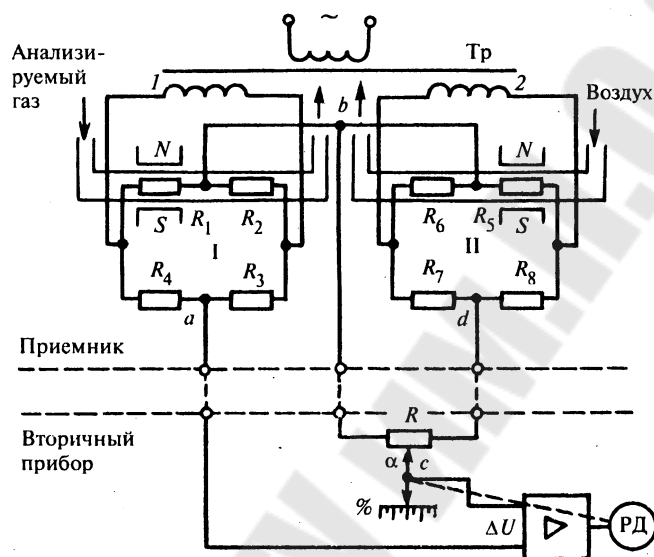


Рис. 6.22 Схема автоматического магнитного газоанализатора типа МН:
1, 2 – вторичные обмотки силового трансформатора Тр

6.4.4 Оптические газоанализаторы

В оптических газоанализаторах концентрация определяемого компонента измеряется по изменению оптических свойств газовой смеси, к числу которых относятся показатели преломления, спектрального поглощения и излучения, спектральная плотность и т.п. Наиболее распространенными являются четыре группы оптических газоанализаторов: **инфракрасного и ультрафиолетового поглощения; фотоколориметрические; люминесцентные; ослабления видимого излучения.** Оптические газоанализаторы обладают большой разрешающей способностью, благодаря чему они применяются для анализа микроконцентраций взрывоопасных и токсичных примесей в промышленных газах, при контроле воздуха в атмосфере и производственных помещениях. Из перечисленных типов газоанализаторов наиболее распространенными являются недисперсионные инфракрасные фотометры (NDIR).

Газоанализаторы инфракрасного и ультрафиолетового поглощения. Каждый газ характеризуется определенным спектром поглощения. Газы, содержащие в своем составе два и более разнородных атомов, такие как CO , CO_2 ,

CH_4 , NH_3 , C_2H_2 имеют спектры поглощения в инфракрасной области. Одноатомные газы характеризуются линейчатыми спектрами поглощения, лежащими в ультрафиолетовой области.

Фотоколориметрические газоанализаторы. В фотоколориметрических газоанализаторах концентрация определяемого компонента в соответствии с законом Ламберта-Бера измеряется по изменению оптической плотности индикаторного раствора, окраска которого избирательно меняется в присутствии определяемого компонента.

Фотоколориметрический метод характеризуется универсальностью, поскольку один и тот же прибор с различными индикаторными растворами может использоваться для анализа разнообразных компонентов газовой смеси. Он отличается также высокой избирательностью, зависящей от специфичности реакции, протекающей между анализируемым компонентом и индикаторным раствором. Возможность накопления определяемого компонента в индикаторном растворе обеспечивает высокую чувствительность метода. Основанные на этом принципе приборы применяются для контроля состояния воздушного бассейна, они измеряют концентрацию в воздухе таких вредных примесей, как NO , NO_2 , SO_2 , Cl_2 , NH_3 , H_2S . Приборы имеют верхний предел измерения от 0,5 до 50 мкг/л в зависимости от анализируемого компонента.

К оптическим методам анализа относятся методы, использующие различные виды люминесценции. **Люминесценция** представляет собой холодное свечение, вызываемое светом (фотолюминесценция, флюоресценция), электрическим полем (электролюминесценция), химическими реакциями (хемилюминесценция). Последняя используется в газоанализаторах для измерения концентрации оксида и диоксида азота в газовых смесях.

6.4.5 Электрические газоанализаторы

В электрических газоанализаторах концентрация того или иного компонента определяется по изменению электрических свойств газовой смеси или жидкости, с которой прореагировал определяемый компонент. К числу наиболее распространенных электрических газоанализаторов относятся **электрохимические**, применяемые для измерения микроконцентраций токсичных газов и кислорода (циркониевые), содержащихся в воздухе и дымовых газах, определения концентрации загрязняющих примесей при производстве чистых газов.

К **электрохимическим газоанализаторам** относятся устройства, в которых выходной сигнал определяется электрохимическими явлениями, происходящими в электродных системах, погруженных в анализируемый газ или контактирующий с ним раствор. Электрохимические методы в основном используются для анализа жидкостей, в связи с чем такие наиболее распространенные разновидности этого метода, как кондуктометрический и потенциометрический, будут рассмотрены в следующей главе. Для анализа газов чаще используются амперометрические, кулонометрические и электрохимические анализа-

торы.

Амперометрические (вольтамперометрические) газоанализаторы.

Если в раствор электролита погружены два электрода, к которым приложена разность напряжений от внешнего или внутреннего источника ЭДС, то во внешней цепи потечет ток, обусловленный движением ионов в растворе. При этом у поверхности электродов собираются ионы противоположного знака, создавая внутри раствора разность напряжений U , направленную встречно действующему в цепи напряжению E .

Ток в цепи

$$I = (E - U) / R, \quad (6.15)$$

где R – сопротивление раствора;

U – разность внутренних потенциалов анода и катода.

Приборы называются **гальваническими**, если действующее в цепи напряжение E создается внутренним источником.

В амперометрических газоанализаторах используется фоновый раствор электролита, в котором при соответствующем материале электродов и уровне действующего напряжения происходит поляризация одного из электродов, и ток в цепи при отсутствии определяемого газа практически равен нулю.

При наличии анализируемого газа в цепи возникает ток, который определяется количеством введенных в фоновый раствор молекул газа, способных окисляться или восстанавливаться на поляризованном электроде, изменяя его потенциал. Сравнительный электрод имеет поверхность, в сотни раз превышающую поверхность измерительного электрода, благодаря чему его потенциал не зависит от протекающего в цепи тока.

При введении в раствор деполяризующего анализируемого газа на поверхности поляризованного электрода протекают следующие реакции: перенос деполяризатора из раствора на поверхность электрода, электрохимическая реакция на электроде, выделение на нем продуктов реакции.

В последние годы, благодаря созданию электролитических ячеек, реагирующих на различные газы, амперометрические газоанализаторы получили широкое распространение для анализа уходящих газов электростанций, промышленных предприятий, двигателей внутреннего сгорания. Так система микропроцессорного контроле КГА-8С осуществляет измерение в составе газовой смеси концентраций O_2 , CO , SO_2 , NO_x . Содержание SO_2 определяется в диапазоне 0...400 и 400...4000 ppm с погрешностью $\pm 10\%$ и NO_x в пределах 0...100 и 100...1000 ppm с погрешностью $\pm 5\%$. Система производит расчет концентрации CO_2 и коэффициента избытка воздуха в топке.

Кулонометрические газоанализаторы основаны на измерении количества электричества, израсходованного при электролизе. Согласно закону

Фарадея для выделения при электролизе количества вещества G необходимо через раствор пропускать ток I в течение времени t , т.е.

$$G = Mit / (96492n), \quad (6.16)$$

где M – молекулярная масса окисленного или восстановленного вещества;

n – число электронов, участвующих в электродном процессе.

Выделившееся при электролизе вещество связывается без остатка с анализируемым компонентом газовой смеси, благодаря чему мерой концентрации последнего служит протекающий ток I . Последний регулируется таким образом, чтобы обеспечивалась нейтрализация раствора.

Кулонометрические газоанализаторы благодаря использованию компенсационного метода измерения обеспечивают высокую точность измерения, их показания не зависят от влажности газа, его давления и температуры, параметров окружающей среды.

Отечественной промышленностью выпускаются кулонометрические газоанализаторы «Атмосфера-1» и «Атмосфера-2», предназначенные для измерения содержания в воздухе микроконцентраций SO_2 , H_2S , Cl_2 , O_3 .

В настоящее время выпускается гамма анализаторов, использующих твердотельные чувствительные элементы. На основе микроэлектронной технологии разработаны полевые транзисторы, в которых металлический затвор заменен веществом, чувствительным к определяемому компоненту. Использование твердотельных чувствительных элементов позволяет осуществить выпуск малогабаритных комбинированных приборов, предназначенных для измерения CO , CO_2 , NO , NO_2 , O_2 в дымовых газах.

Циркониевые кислородомеры

Широкое распространение получили электрохимические кислородомеры с использованием диоксида циркония. Их преобразователь представляет собой две камеры, разделенные между собой мембраной из диоксида циркония. При температуре $550...570$ °С на мембране возникает разность потенциалов, зависящая от содержания кислорода в каждой из камер. Напряжение снимается с платиновых электродов, находящихся на обеих поверхностях мембраны. В одну камеру подается анализируемый газ, а в другую – воздух. Преобразователь выполняется в виде зонда, который вводится в газоход котла или любой поток газов. Указанный уровень температур поддерживается автоматически с помощью электрических нагревателей. К числу таких кислородомеров относятся АКТВ (ф. «Аналитприбор» г. Смоленск), ТДК-ЗМ (ф. «Цир г.Москва). Пределы измерения АКТВ составляют $0,1...2$ (5; 10) % при погрешностях соответственно $\pm 0,08$; $0,2$; $0,4$ %.

6.4.6 Хроматографические газоанализаторы

Хроматографические газоанализаторы предназначены для анализа мно-

гокомпонентных газовых смесей, состава жидкостей и твердых тел. Хроматографы являются приборами периодического действия, более сложными по устройству, чем рассмотренные газоанализаторы.

Процесс измерения в этих приборах распадается на две стадии: хроматографическое разделение газовой смеси на отдельные компоненты и идентификация (детектирование) компонентов, включающая качественный и количественный их анализ. Хроматографическое разделение смеси на отдельные компоненты осуществляется за счет различной скорости движения газов вдоль слоя сорбента, обусловленной характером внешних и внутренних межмолекулярных взаимодействий.

В настоящее время по возможностям разделения и анализа многокомпонентных смесей хроматография не имеет конкурирующих методов. Хроматографию можно использовать для анализа низкокипящих газов, смесей летучих и термически стойких твердых и жидких веществ, температура кипения которых достигает $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ и выше. К числу преимуществ этого метода относится также высокая чувствительность (достигающая при использовании ионизационных детекторов $10^{11}\dots 10^{-12}\text{ г/см}^3$) в сочетании с малым объемом отбираемой пробы, сравнительно высокой точностью и малым временем анализа.

Существует три разновидности хроматографического метода измерения, различающиеся способом перемещения анализируемой смеси: **проявительный, фронтальный** и **вытеснительный**. Первый метод является наиболее распространенным. В его рамках различают следующие разновидности, обусловленные процессом разделения смеси на компоненты: **газоадсорбционный, газожидкостный** и **капиллярный**. Последний является разновидностью газожидкостного способа разделения.

Принципиальные схемы хроматографа и разделения смеси газов в колонке представлены на рис. 6.23.

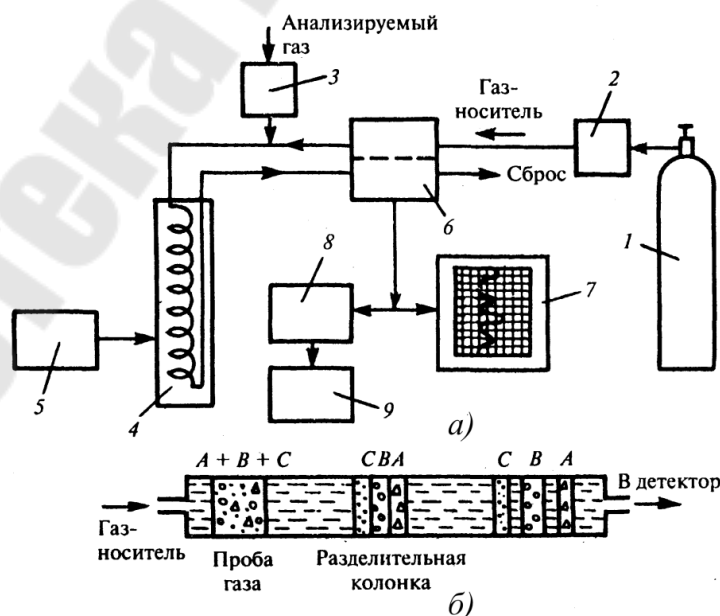


Рис. 6.23 Принципиальная схема газового трансформатора:

1 – баллон; 2 – регулятор; 3 – дозатор; 4 – разделительная колонка; 5 - терморегулятор; 6 – детектор; 7 – регистрирующий прибор; 8, 9 – микропроцессорное и цифropечатающее устройство

Из баллона 1 газ-носитель поступает в хроматограф. Для поддержания в процессе работы постоянной скорости газа-носителя используется регулятор 2, содержащий редуктор, манометр и измеритель расхода газа. В газ-носитель дозатором 3 периодически вводится проба анализируемого газа. В разделительной колонке 4, заполненной твердым или жидким сорбентом, анализируемая смесь разделяется на компоненты. Вдоль слоя сорбента с большей скоростью движутся наименее сорбируемые газы. Поэтому в пробе смеси газов (рис. 6.23б), содержащей три компонента *A*, *B* и *C*, первым выносятся наименее сорбируемый газ *A*, а последним – хорошо сорбируемый *C*. После разделения каждый компонент с газом-носителем образует бинарную смесь, анализ которой может быть произведен различными методами, в том числе рассмотренными выше и реализуемыми в детекторе 6. Поскольку в процессе измерения свойства газа-носителя могут меняться, при пропускании последнего через детектор фиксируются изменения его свойств, вызванные присутствием компонента анализируемой смеси.

Для улучшения разделения компонентов температурный режим колонки может меняться с помощью терморегулятора 5 с программным управлением. Выходной сигнал детектора 6 подается на регистрирующий прибор 7, микропроцессорное 8 и цифropечатающее 9 устройства. На диаграмме самопишущего прибора 7 выход каждого из компонентов сопровождается пиком, площадь которого зависит от концентрации этого газа. График, фиксирующий выход компонентов, называют **хроматограммой**.

Хроматографическое разделение – сложный процесс, составляющими которого являются сорбция, десорбция, диффузия.

СОДЕРЖАНИЕ

ГЛАВА 1 ВВЕДЕНИЕ. ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ ИЗМЕРЕНИЙ.....	2
1.1 Международная система единиц измерения.....	4
1.2 Методы измерений.....	5
1.3 Теплотехнические измерения и теплотехнический контроль.....	6
ГЛАВА 2 ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ.....	8
2.1 Основные свойства измерительных приборов.....	8
2.2 Основные элементы измерительных приборов.....	9
2.3 Классификация измерительных приборов.....	11
2.4 Государственная система приборов.....	13
ГЛАВА 3 ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ.....	14
3.1 Классификация погрешностей измерений.....	14
3.2 Поверка измерительных приборов.....	16
3.3 Допускаемые погрешности и класс точности приборов.....	17
ГЛАВА 4 ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ.....	19
4.1 Температурные шкалы.....	19
4.2 Классификация приборов для измерения температуры.....	22
4.3 Термометры расширения.....	22
4.3.1 Жидкостные термометры.....	22
4.3.2 Дилатометрические термометры.....	24
4.3.3 Установка, поверка и поправки к показаниям термометров расширения.....	25
4.4 Манометрические термометры.....	28
4.5 Термоэлектрические термометры.....	30
4.5.1 Основные свойства термоэлектрических термометров.....	30
4.5.2 Термоэлектродные материалы.....	32
4.5.3 Типы и характеристики термоэлектрических термометров.....	32
4.5.4 Устройство термоэлектрических термометров. Поверка.....	34
4.5.5 Магнитоэлектрические милливольтметры.....	35
4.5.6 Потенциометры.....	36
4.6 Термометры сопротивления.....	42
4.6.1 Основные свойства термометров сопротивления.....	42
4.6.2 Типы и характеристики термометров сопротивления.....	43

4.6.3 Устройство термометров сопротивления.....	44
4.6.4 Измерительные мосты.....	45
4.6.5 Магнитоэлектрические логометры.....	48
4.7 Измерение температуры тел по их тепловому излучению....	48
4.7.1 Монохроматические пирометры.....	50
4.7.2 Пирометры полного и частичного излучения.....	52
4.7.3 Пирометры спектрального отношения.....	54
ГЛАВА 5 ИЗМЕРЕНИЕ ДАВЛЕНИЯ И РАЗРЕЖЕНИЯ.....	56
5.1 Единицы и методы измерений. Приборы измерения давления и разрежения (классификация).....	56
5.2 Жидкостные манометры и дифманометры.....	58
5.2.1 Двухтрубные жидкостные манометры.....	58
5.2.2 Однотрубные манометры.....	59
5.2.3 Микроманометры.....	61
5.2.4 Барометры.....	62
5.2.5 Компрессионные манометры.....	62
5.2.6 Установка, поверка и поправки к показаниям жидкостных манометров.....	64
5.3 Деформационные манометры и дифманометры.....	64
5.3.1 Пружинные манометры.....	66
5.3.2 Сильфонные манометры.....	67
5.3.3 Мембранные манометры.....	68
5.3.4 Установка, поверка и поправки к показаниям деформационных манометров.....	69
5.3.5 Электрические и прочие манометры.....	70
5.4 Грузопоршневые манометры.....	72
5.5 Вакуумметры и мановакуумметры.....	74
ГЛАВА 6 СПЕЦИАЛЬНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ.....	77
6.1 Приборы для измерения уровня.....	77
6.1.1 Уровнемеры с визуальным отсчетом.....	77
6.1.2 Гидростатические уровнемеры.....	78
6.1.3 Дифманометрические уровнемеры.....	79
6.1.4 Поплавковые и буйковые уровнемеры.....	80
6.1.5 Емкостные уровнемеры.....	83
6.1.6 Индуктивные уровнемеры.....	84
6.1.7 Радиоволновые уровнемеры.....	86
6.1.8 Акустические уровнемеры.....	86

6.1.9 Термокондуктометрические уровнемеры.....	88
6.1.10 Измерение уровня сыпучих материалов.....	89
6.2 Приборы измерения расхода жидкости, пара, газа и воздуха.....	91
6.2.1 Основы теории измерения расхода по перепаду давления в сужающих устройствах.....	92
6.2.2 Расходомеры постоянного перепада давления, тахометрические и электромагнитные.....	94
6.2.3 Ультразвуковые, вихревые и массовые расходомеры. Теплосчетчики.....	102
6.3 Измерение влажности.....	105
6.3.1 Методы измерения влажности воздуха и газа.....	106
6.3.2 Методы измерения влажности твердых и сыпучих тел.....	110
6.4 Анализ состава газов.....	111
6.4.1 Объемные химические газоанализаторы.....	112
6.4.2 Тепловые газоанализаторы.....	114
6.4.3 Магнитные газоанализаторы.....	115
6.4.4 Оптические газоанализаторы.....	117
6.4.5 Электрические газоанализаторы.....	118