

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ»**

А.А. Денисевич, С.Н. Ливенцов, Е.В. Ефремов

**МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ
ПАРАМЕТРОВ ЯДЕРНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ
УСТАНОВОК**

*Рекомендовано в качестве учебного пособия
Редакционно-издательским советом
Томского политехнического университета*

Издательство
Томского политехнического университета
2014

УДК 321.039.577(075.8)

ББК 21.4я73

Д332

Денисевич А.А.

Д332

Методы контроля технологических параметров ядерных энергетических установок: учебное пособие/ А.А. Денисевич, Е.В. Ефремов, С.Н. Ливенцов; Национальный исследовательский Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2014. – 90 с.

В учебном пособии рассматриваются основы технологии измерения и методы измерения таких технологических параметров ядерных энергетических установок как температура, давление, расход и уровень, на основе которых работают современные контрольно-измерительные приборы.

Пособие предназначено для студентов, обучающихся по образовательной программе подготовки дипломированных специалистов по специальности 14.05.04 «Электроника и автоматика физических установок».

УДК 321.039.577(075.8)

ББК 21.4я73

Рецензенты

Доктор технических наук, профессор СТИ НИЯУ МИФИ

Б.М. Кербель

Доктор технических наук, профессор ТУСУР

Н.В. Замятин

© ФГАОУ ВО НИ ТПУ

© Денисевич А.А., Ливенцов С.Н., Ефремов Е.В.,
2014

© Оформление. Издательство Томского
политехнического университета, 2014

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	5
1. Эволюция развития информационно-измерительных систем.....	7
1.1. Основы техники измерений.....	7
1.2. Классификация преобразователей и датчиков	10
2. Измерение температуры	13
2.1. Понятие температуры и типы шкал её измерения	13
2.2. Термометры расширения	16
2.2.1. Жидкостный термометр.....	16
2.2.1. Манометрические термометры	21
2.3. Термометры сопротивления	23
2.3.1. Принцип действия термометров сопротивления	23
2.3.2. Чувствительность термометров сопротивления	24
2.3.3. Типы термопреобразователей сопротивления	26
2.3.3. Мостовые схемы подключения термометров сопротивления.....	28
2.4. Термоэлектрические преобразователи (термопары)	31
2.4.1. Принцип действия термоэлектрического преобразователя.....	31
2.4.2. Законы термоэлектрических цепей	34
2.4.3. Алгоритм измерения температуры термопарами	36
2.4.4. Конструкция термопар.....	39
2.4.5. Преимущества термоэлектрических преобразователей	41
3. Измерение давления	43
3.1. Основные понятия	43
3.2. Методы измерения давления.....	44
3.2.1. Жидкостные преобразователи давления.....	44
3.2.1. Деформационные преобразователи давления	46
4. Измерение расхода	50
4.1. Расходомеры переменного перепада давления	50
4.1.1. Расходомеры с сужающими устройствами.....	50
4.1.2. Особенности применения сужающих устройств	53
4.1.2. Особенности эксплуатации	55
4.2. Вихревые расходомеры.....	57
4.3. Электромагнитные расходомеры.....	60
4.3.1. Электромагнитные расходомеры с постоянным магнитным полем	60
4.3.2. Электромагнитные расходомеры с переменным магнитным полем	63

4.3.3. Особенности применения электромагнитного метода измерения расхода	64
4.4. Тахометрические расходомеры.....	67
4.4.1. Турбинные расходомеры	67
4.4.2. Шариковые расходомеры	68
5. Измерение уровня.....	71
5.1. Механические уровнемеры.....	72
5.1.1. Поплавковые уровнемеры	72
5.1.2. Буйковые уровнемеры.....	73
5.2. Гидростатические уровнемеры	73
5.3. Ультразвуковые уровнемеры	75
5.4. Микроволновые радарные уровнемеры.....	76
5.5. Радиоизотопные уровнемеры.....	80
5.6. Электрические уровнемеры.....	81
5.6.1. Емкостные уровнемеры	81
5.6.2. Кондуктометрические уровнемеры	83
5.6.3. Вибрационные уровнемеры.....	85
Список литературы.....	87

ВВЕДЕНИЕ

Контроль технологических параметров систем повышенной опасности, которыми являются ядерные энергетические установки, является важнейшим направлением обеспечения их нормального функционирования.

Контроль является первым и основным звеном в автоматизации производственного процесса, так как для поддержания установленного режима производства необходимо знать текущие значения параметров определяющих этот режим.

На сегодняшний день функция контроля обеспечивается применением различных контрольно-измерительных приборов, оценивающих значения параметров технологических процессов. С процесса измерения начинаются простые, а подчас и очень сложные процессы в автоматизированных системах, и от того, с какой точностью измерена исходная величина, зависит результат дальнейшего преобразования в последующих элементах системы.

Пособие подготовлено на кафедре «Электроника и автоматика физических установок» ТПУ и предназначено для студентов очного обучения специальности 140801 «Электроника и автоматика физических установок». Пособие также может быть использовано студентами других специальностей, изучающих методы, приборы и системы контроля технологических процессов в различных отраслях промышленности.

Учебное пособие содержит пять разделов.

В первом разделе рассмотрены общие положения измерения технологических параметров.

Второй раздел посвящен описанию методов измерения температуры и принципам действия измерительных приборов, измеряющих данный технологический параметр.

В третьем разделе изложены принципы измерения давления, описаны преобразователи давления различных типов.

Четвёртый раздел посвящён контролю такого технологического параметра, как расход вещества. Описаны особенности измерения расхода датчиками, принципы работы которых основаны на вихревом, электромагнитном, тахометрическом способах и на методе переменного перепада давления.

В пятом разделе рассматриваются контактные и бесконтактные методы измерения уровня жидкостей и сыпучих веществ, а также принципы работы датчиков измерения уровня.

Задача пособия – способствовать формированию у обучающихся знаний основ функционирования приборов контроля основных технологических параметров ядерных энергетических установок, что позволит им на практике осуществить выбор типа необходимого контрольно-измерительного прибора, удовлетворяющего требованиям и особенностям производства.

Авторы выражают признательность коллективу кафедры «Электроника и автоматика физических установок» Физико-технического института Томского политехнического университета за ценные рекомендации и замечания.

1. ЭВОЛЮЦИЯ РАЗВИТИЯ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

1.1. Основы техники измерений

Задачей контроля является обнаружение событий, определяющих ход того или иного процесса. В случае, когда эти события обнаруживаются без непосредственного участия человека, такой контроль называют автоматическим.

Важнейшей составной частью контроля является измерение физических величин, характеризующих протекание процесса.

Процессы в ядерных энергетических установках характеризуются значениями таких основных физических величин (переменных) как:

- температура жидкости и газа (в потоке и объеме), на поверхности и внутри технологических линий и агрегатов;
- Давление, (вакуум) в технологических линиях и агрегатах;
- расход жидкостей и газов (пара), в технологических трубопроводах;
- уровень жидкости в емкостях и технологических трубопроводах;
- химический состав и концентрация жидких паровых и газовых сред;
- значения напряжения, силы тока и других электрических величин постоянного и переменного тока;
- уровень нейтронного потока и ионизирующих излучений и др.

Измерить физическую величину – значит сравнить ее с соответствующей единицей измерения. Нахождение величины параметра опытным путем с помощью специальных технических средств называется измерением.

Конечной целью любого измерения является получение количественной информации об измеряемой величине. В процессе измерения устанавливается, во сколько раз измеряемая физическая величина больше или меньше однородною с нею в качественном отношении физической величины принятой за единицу.

Число, выражающее отношение измеряемой величины к единице измерения, называется числовым значением измеряемой величины.

Чем меньше выбранная единица, тем больше для данной измеряемой величины будет числовое значение. Например. Длина 1 м равна 10 дм, 100 см и т.д.

Результат всякого измерения является именованным числом. Поэтому для определенности написания результата измерения рядом с числовым значением измеряемой величины ставится сокращенное обозначение принятой единицы измерения.

Управление технологическими процессами, как известно, невозможно без измерения технологических параметров. Измерительное устройство является обязательным элементом любой автоматической системы регулирования.

Измерительное устройство, с помощью которого осуществляется процесс измерения – это совокупность технических средств, соединенных в измерительную цепь.

Измерительные устройства по виду вырабатываемой ими информации делятся на измерительные приборы и измерительные преобразователи.

Измерительные преобразователи – это устройства, предназначенные для выработки измерительной информации в форме, удобной для передачи, преобразования, обработки и хранения сигнала, но не поддающейся непосредственному восприятию наблюдателем.

На заре автоматизации человек вел технологический процесс, находясь возле местных контрольно-измерительных приборов, установленных непосредственно на оборудовании и работающих в прямом контакте с материальными потоками. Эти средства давали ему возможность более точно и, главное, объективно оценивать работу технологического объекта и, следовательно, улучшать его использование. Данному уровню автоматизации технологического процесса соответствовала и архитектура построения контрольно-измерительных приборов.

К *измерительным приборам* (ИП) относят устройства, предназначенные для выработки измерительной информации в форме, доступной для непосредственного восприятия оператором. Измерительными приборами являются, например, ртутный термометр, вольтметр и т.д. Так как сигнал, предназначенный для наблюдения, является выходным сигналом измерительной цепи, то измерительный прибор всегда бывает последним преобразователем этой цепи.

Простая измерительная цепь состоит из одного измерительного прибора *ИП* (рис. 1).

В сложной измерительной цепи, составленной из нескольких последовательно соединенных измерительных преобразователей, первый

называется *первичным преобразователем* или *сенсорным элементом*, а другие измерительные преобразователи называют *вторичными*.

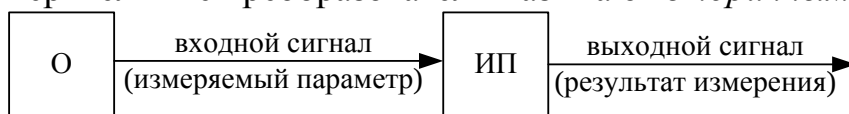


Рис. 1. Простая измерительная цепь:

О – объект измерения, ИП – измерительный прибор

Чтобы иметь возможность осуществлять автоматическое управление технологическими процессами, необходимо иметь количественную информацию о соответствии протекаемого процесса заданным режимам работы. При этом информация должна поступать на регулирующее устройство в виде электрического сигнала, который в последнее время является наиболее распространенным по сравнению с пневматической формой. Количественную форму представления информации об интересующих нас параметрах технологических процессов обеспечивают датчики.

Датчиком называется устройство, воспринимающее контролируемый параметр и преобразующее его в электрический сигнал, который легко может быть измерен или сопоставлен с заданной величиной. Датчик может состоять из одного или нескольких преобразователей. Это определяется сенсорным элементом датчика, в качестве которого выступает первичный преобразователь.

Если выходной сигнал первичного преобразователя имеет электрическую форму, т.е. в виде тока или напряжения, то в этом случае отпадает необходимость в применении дополнительного вторичного преобразователя для осуществления преобразования промежуточной формы сигнала в электрическую. Примером такого датчика, состоящего из одного преобразователя, является термопара, с помощью которой производят измерение температуры контролируемой среды.

Примером сложной конструкции датчика, состоящего из нескольких измерительных преобразователей, является датчик давления. Первичный преобразователь данного устройства осуществляет преобразование измеряемого давления в объекте контроля в соответствующие деформационные изменения мембраны, которые приводят к ее растяжению или сжатию. Применение вторичного тензометрического преобразователя позволяет преобразовать деформационные воздействия на мембрану в соответствующие изменения сопротивления тензорезисторного преобразователя, которые трансформируются в электрический сигнал с помощью мостовой схемы, являющейся третьим преобразователем в датчике давления.

В настоящее время разработано большое количество типов и модификаций датчиков, в основу работы которых положены различные варианты сочетаний измерительных преобразователей и отличающиеся также различными конструктивными и схемными вариантами выполнения.

Учитывая данное обстоятельство, классификацию датчиков правильно производить по первичному преобразователю, т.е. по принципу действия на котором основано работа сенсорного элемента, являющегося основополагающим в работе любого датчика. Кроме того, датчики иногда целесообразно классифицировать по виду входных или выходных величин.

Таким образом, осуществление автоматизации технологических процессов на локальном уровне потребовало создания датчиков генерирующих электрический сигнал пропорциональный величине регистрируемого технологического параметра. В результате этого в датчиках стали устанавливать вторичные преобразователи, выходной характеристикой которых стали значения аналогового электрического сигнала. С помощью выходного электрического сигнала удалось отделить датчик от измерительного прибора и поместить измерительный прибор на щите оператора, где обеспечены нормальные условия эксплуатации.

1.2. Классификация преобразователей и датчиков

При классификации датчиков часто используют принцип действия измерительного первичного преобразователя, т.е. явление, положенное в основу работы сенсорного элемента данного датчика. Кроме того, датчики иногда целесообразно классифицировать по виду входных или выходных величин.

В зависимости от принципа действия преобразователи сигналов можно разделить на две большие группы:

- *генераторные преобразователи* характеризуются тем, что в них осуществляется непосредственное преобразование различных видов энергии в электрическую (т.е. они генерируют электрическую энергию). Перечень таких преобразователей представлен в таблице 1.
- *параметрические преобразователи* (табл.2) характеризуются тем, что контролируемая величина преобразуется в параметр электрической цепи: сопротивление, индуктивность, взаимную индуктивность или емкость. Причем, чтобы обнаружить изменение параметров цепи под действием измеряемой величины, необходимы вспомогательные источники электрической энергии.

Таблица 1

Генераторные преобразователи

Название	Принцип действия, явление или физический закон
Индукционные преобразователи	использующие явление электромагнитной индукции (закон электромагнитной индукции-закон Фарадея и Максвелла).
Термоэлектрические преобразователи (термопары)	использующие явление термоэлектрического эффекта, возникающего в цепи термопары в зависимости от разности температур ее рабочего и холодного концов (эффект Пельтье)
Фотоэлектрические преобразователи	использующие зависимость э.д.с. фотоэлемента с запирающим слоем от освещенности
Пьезоэлектрические преобразователи	основанные на использовании пьезоэлектрического эффекта, возникающего в некоторых кристаллах (кварц, турмалин и др.) в зависимости от значений и характера приложенных к кристаллу упруго деформирующих его сил
Преобразователи электрических потенциалов (датчики РН-метров)	использующие зависимость концентрации водных растворов от концентрации водородных ионов в растворе, которую можно определить по потенциалу, возникающему на границе различных электродов, опущенных в контролируемый раствор
Гальванические преобразователи	основанные на зависимости э.д.с. гальванического элемента от состава и концентрации растворов электролита.

Таблица 2

Параметрические преобразователи

Название	Принцип действия, явление или физический закон
Реостатные преобразователи	использующие зависимость сопротивления реостата от положения его движка
Тензометрические преобразователи (тензодатчики)	основанные на изменении сопротивления проводника при его растяжении или сжатии
Преобразователи термосопротивления	основанные на использовании свойств проводника изменять свое сопротивление в зависимости от температуры
Емкостные преобразователи	основанные на зависимости электрической емкости конденсатора от размеров, взаимного расположения частей его обкладок и электрической проницаемости его диэлектрика
Индуктивные преобразователи	использующие зависимость между индуктивностью дросселя, длиной и площадью его сердечника, взаимным расположением частей магнитопровода
Преобразователи фотосопротивления	Основанные на изменении сопротивления фотоэлемента (с внешним или внутренним фотоэффектом) в зависимости от освещения
Ионизационные преобразователи	Основанные на зависимости динамического сопротивления газового разрядного промежутка от степени его ионизации

Приведенный перечень измерительных преобразователей не охватывает, конечно, всех типов и тем более не отражает большого разнообразия модификаций преобразователей одного типа.

Датчики можно классифицировать также и по виду их входных величин. Такая классификация может оказаться полезной при решении задачи выбора датчиков для заданных контролируемых параметров.

По виду входных величин датчики обычно разделяются на следующие группы:

- датчики перемещения;
- датчики усилия;
- датчики момента вращения;
- датчики размеров;
- датчики уровня;
- датчики скорости;
- датчики ускорения;
- датчики параметров вибрации;
- датчики давления;
- датчики расхода;
- датчики температуры;
- датчики влажности;
- датчики для анализа состава веществ;
- нейтронные датчики и др.

В пределах каждой группы возможно и дальнейшее разделение датчиков. Например, можно различать датчики линейного и углового перемещения, датчики высоких и низких температур.

Следует отметить, что восприятие и преобразование одних и тех же входных величин может осуществляться датчиками, основанными на самых различных принципах действия. Так, например, датчики перемещения могут быть реостатные датчики, датчики контактного сопротивления, фотосопротивления, датчики индуктивные, емкостные.

2. ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ

2.1. Понятие температуры и типы шкал её измерения

Теплота – это кинетическая часть внутренней энергии вещества, определяемая интенсивным хаотическим движением молекул и атомов, из которых это вещество состоит.

Количество тепловой энергии в веществе нельзя определить, наблюдая за движением каждой его молекулы по отдельности. Напротив, только изучая макроскопические свойства вещества, можно найти усредненные за некий период времени характеристики микроскопического движения многих молекул.

Температура вещества – это средний показатель интенсивности движения молекул, энергия которого и есть тепловая энергия вещества.

Из того, что температура является кинетической энергией молекул, ясно, что наиболее естественно измерять её в энергетических единицах (т.е. в системе СИ в джоулях).

Однако измерение температуры началось задолго до создания молекулярно-кинетической теории, поэтому практические шкалы измеряют температуру в условных единицах – градусах.

Если мы хотим проводить точные эксперименты и вычисления, то таких оценок температуры, как горячий, теплый, прохладный, холодный, недостаточно – нам нужна градуированная температурная шкала. Исторически было создано достаточно много шкал, но на практике для измерений используются только три температурные шкалы:

- шкала Френгейта;
- шкала Цельсия;
- шкала Кельвина.

Существует несколько версий происхождения шкалы Фаренгейта. По одной из них, Габриель Фаренгейт (1686–1736 гг.) изначально принял за 0 °F температуру плавления (замерзания) смеси льда и поваренной соли в равных количествах, а за 100 °F – нормальную температуру человеческого тела (однако Фаренгейт ошибся в последнем измерении: нормальная температура человеческого тела составляет 97,9 °F).

Существует легенда, согласно которой за 100 градусов температурной шкалы Фаренгейт принял температуру тела своей жены, которая в момент измерения была нездорова – именно этим и обусловлено смещение стоградусной точки на 2,1°F, а не погрешностью самого измере-

ния. Сам Фаренгейт полагал, что температура (по его шкале) никогда не бывает отрицательной, видимо он ни разу не был в холодных странах.

В 1742 г. шведский астроном Андерс Цельсий (1701–1744 гг.) предложил 100-градусную шкалу термометра, в которой за 0 градусов принимается температура кипения воды при нормальном атмосферном давлении, а за 100 градусов - температура таяния льда. Деление шкалы составляет 1/100 этой разницы. Когда стали использовать термометры, оказалось удобнее поменять местами 0 и 100 градусов.

Возможно, в этом участвовал Карл Линней (он преподавал медицину и естествознание в том же Упсальском университете, где Цельсий – астрономию), который еще в 1838 году предложил за 0 температуры принять температуру плавления льда, но, похоже, не додумался до второй реперной точки.

К настоящему времени шкала Цельсия несколько изменилась: за 0 °C по-прежнему принята температура таяния льда при нормальном давлении, которая от давления не очень зависит. Зато температура кипения воды при атмосферном давлении теперь равна 99,975 °C, что не отражается на точности измерения практически всех термометров, кроме специальных прецизионных.

По температурной шкале Фаренгейта точкам замерзания и кипения воды соответствуют крайне неудобные числа 32 и 212 °F (при нормальном атмосферном давлении). Диапазон 0–100° по шкале Фаренгейта примерно соответствует диапазону от минус 18° до 38° по шкале Цельсия. Шкала Фаренгейта широко используется до сих пор в США, Канаде и на Ямайке, но ею почти не пользуются в научной литературе. Формулы перевода из температурной шкалы Фаренгейта в шкалу Цельсия и обратно выглядят следующим образом:

$$t(^{\circ}\text{C}) = \frac{5}{9} \cdot [t(^{\circ}\text{F}) - 32]; \quad t(^{\circ}\text{F}) = \frac{9}{5} \cdot t(^{\circ}\text{C}) + 32. \quad (1)$$

В 1848 г. английский ученый лорд Уильям Кельвин (1824-1907 г.) предложил более точный способ измерения температуры. По этой шкале нулевая точка или абсолютный нуль представляет собой самую низкую температуру, какая только возможна, т.е. некое теоретическое состояние вещества, при котором его молекулы и атомы перестают двигаться. Это значение было получено путем теоретического изучения свойств газа, находящегося под нулевым давлением.

Термодинамическая температура с молекулярно-кинетической точки зрения – физическая величина, характеризующая интенсивность хаотического, теплового движения всей совокупности частиц системы и

пропорциональная средней кинетической энергии поступательного движения одной частицы.

Связь между кинетической энергией, массой и скоростью выражается следующей формулой:

$$E_k = \frac{m \cdot v^2}{2}, \quad (2)$$

где m – масса;

v – скорость.

Таким образом, частицы одинаковой массы и имеющие одинаковую скорость имеют и одинаковую температуру. Средняя кинетическая энергия частицы связана с термодинамической температурой постоянной Больцмана:

$$E_{\text{ср}} = \frac{i \cdot k_B \cdot T}{2}, \quad (3)$$

где i – число степеней свободы;

$k_B = 1,380\,65 \cdot 10^{-23}$ Дж/К – постоянная Больцмана;

T – термодинамическая температура.

В предложенной Кельвином шкале температура отсчитывается от абсолютного нуля (состояние, соответствующее минимальной теоретически возможной внутренней энергии тела), а один кельвин равен $1/273,16$ расстояния от абсолютного нуля до тройной точки воды (состояния, при котором лёд, вода и водяной пар находятся в равновесии).

Для пересчета кельвинов в энергетические единицы служит постоянная Больцмана. Используются также производные единицы: килокельвин, мегакельвин, милликельвин и т.д.

Таким образом, термодинамическая шкала строится на одной реперной точке – тройной точке воды. Нижним пределом шкалы является абсолютный нуль. Исходя из этого, единица измерения температуры – Кельвин = $1/273,16$ температурного интервала между тройной точкой воды и 0° Кельвина. При этом той же величине равен и градус Цельсия.

Тройная точка воды может быть найдена с большей точностью, чем температура таяния льда, и не зависит от давления, т.к. давление в тройной точке воды также имеет единственное значение. Диаграмма состояния воды в координатах температуры T и давления P показана на рис. 2.

Кривая I (кривая таяния льда) характеризует состояние равновесия при имеющемся давлении твердой и жидкой фаз. Каждая точка этой кривой определяет температуру таяния льда при данном давлении.

Кривая II (кривая давления пара) характеризует равновесие жидкой и газообразной фаз. Это зависимость температуры кипения воды от давления.

Тройной точке соответствует температура $T = 273,16$ К и давление $P = 609$ Па.

Температура плавления льда, принятая за нуль шкалы Цельсия, на $0,01$ градуса ниже температуры тройной точки.

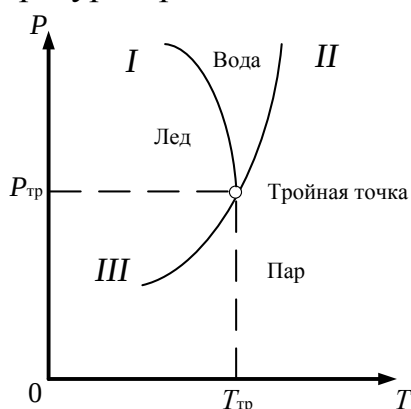


Рис. 2. Диаграмма тройной точки

Поэтому по термодинамической шкале температура плавления льда равна $273,15$ К и нуль шкалы Цельсия равен $273,15$ К, а точка 100 °С соответствует точке $373,15$ К. Значения температуры по шкале Цельсия и по Кельвину связаны следующим соотношением:

$$T(^{\circ}\text{K}) = t(^{\circ}\text{C}) + 273,15. \quad (4)$$

Разность в градусах Цельсия равна разности температур в градусах Кельвинах.

На практике для измерения температуры используют следующие приборы:

- термометры расширения;
- термопара;
- термометр сопротивления;
- пирометры и др.

2.2. Термометры расширения

2.2.1. Жидкостный термометр

Один из наиболее распространенных способов измерения температуры основан на явлении изменения объема тел в зависимости от температуры. На основе использования этого явления созданы, в частно-

сти, жидкостные стеклянные термометры, дающие возможность определять измеряемую температуру непосредственно по длине столбика жидкости.

Явление температурного расширения тел использовано в создании жидкостных, паровых и газовых термометров (манометрические термометры) и термометров с твердыми рабочими телами (дилатометрические, биметаллические термометры).

Некоторые из этих устройств используются и для регистрации температуры и как элементы первичных преобразователей в регуляторах или сигнализаторах температуры. К достоинствам термометров расширения относятся их простота, надежность, отсутствие необходимости вторичного преобразователя.

Принцип действия термометров расширения основан на том факте, что изменение плотности тел приводит к изменению их линейных размеров (длины, ширины) и объема.

Как известно, объем тела заданной массы зависит от температуры. Представим себе тело в виде куба со стороной, длина которой l . Учитывая, что изменение линейных размеров куба происходит пропорционально росту температуры:

$$l = l_0(1 + \alpha\Delta t), \quad (5)$$

где l_0 – длина ребра куба при нулевой температуре;

l – длина ребра куба;

α – коэффициент линейного расширения тела.

С учетом равенства (5) объем куба будет равен:

$$V = l^3 = l_0^3(1 + \alpha\Delta t)^3. \quad (6)$$

Величина $\alpha\Delta t$, как правило, мала по сравнению с единицей. Например, для стали $\alpha = 13 \cdot 10^{-6}$ и даже при разности температур в 100°C величина α составляет всего 0,0013. Поэтому выражение (6) довольно точно можно представить в виде:

$$V = V_0(1 + 3\alpha\Delta t), \quad (7)$$

где V_0 – объём тела при нулевой температуре.

Обозначив $3\alpha = \beta$, получим зависимость объёма тела от температуры в следующем виде:

$$V = V_0(1 + \beta\Delta t) \quad (8)$$

где β – объемный коэффициент расширения.

Из уравнения (8) следует, что коэффициент объемного расширения в 3 раза больше коэффициента линейного расширения.

Рассмотрим устройство жидкостного термометра. Жидкостные термометры расширения состоят, как правило, из стеклянного баллона,

к которому припаян стеклянный капилляр. Баллон и часть капилляра заполнены жидкостью, имеющей большой коэффициент объемного расширения, так называемой термометрической жидкостью. Рядом с капилляром может быть прикреплена шкала. В некоторых случаях шкала наносится непосредственно на капилляр. Составим уравнение, связывающее изменение температуры с показаниями подобного прибора.

Обозначим объем жидкости, заполняющей баллон и часть капилляра, при нулевой температуре через V_0 . Объем жидкости $V_{\text{ж}}$ при температуре t будет равен:

$$V_{\text{ж}} = V_0(1 + \beta_{\text{ж}}(t - t_0)), \quad (9)$$

где $\beta_{\text{ж}}$ – объемный коэффициент расширения жидкости термометра.

Объем стеклянного баллона и капилляра с ростом температуры также изменится:

$$V_{\text{ст}} = V_0(1 + \beta_{\text{ст}}(t - t_0)), \quad (10)$$

где $\beta_{\text{ст}}$ – объемный коэффициент расширения стекла термометра.

Разность объема будет равна объему столбика жидкости, выступающего выше уровня нулевой температуры:

$$V_{\text{ж}} - V_{\text{ст}} = hS, \quad (11)$$

где S – поперечное сечение капилляра;

h – высота столбика жидкости в капилляре над уровнем нулевой температуры.

Подставляя в (11) значения объемов из предыдущих уравнений, получаем:

$$h = \frac{V_0}{S}(\beta_{\text{ж}} - \beta_{\text{ст}})(t - t_0). \quad (12)$$

Проградуировав термометр, т.е. отметив каждое значение h , соответствующее определенной температуре t , можно в дальнейшем пользоваться этим термометром для определения температуры.

Как видно из уравнения (12), чувствительность жидкостного термометра расширения зависит не только от разности коэффициентов объемного расширения, но также и от отношения объема термометрической жидкости к сечению капилляра.

Это отношение и дает возможность увеличить чувствительность жидкостного термометра.

Если, например, объем термометрической жидкости взять в 1 см^3 , а площадь поперечного сечения капилляра в 1 мм^2 , то отношение объема к сечению в таком термометре составит $1000 \text{ мм}^3 : 1 \text{ мм}^2 = 1000 \text{ мм}$, т.е. это отношение соответствует длине в 1 м, хотя все устройство имеет длину в несколько сантиметров.

Для большей чувствительности можно еще уменьшить площадь поперечного сечения капилляра и еще увеличить объем баллона для термометрической жидкости.

Предположим, что нужно измерить температуру в диапазоне от 290 до 300 °С с точностью до 0,1 °С. Если для этих целей взять термометр со шкалой от 0 до 300 °С, у которого расстояние между делениями составляет 1 мм, то длина шкалы такого термометра будет равна 3 м. Ясно, что шкала такой длины неудобна для работы. Чтобы укоротить шкалу, можно в капилляре делать расширение, чтобы полученный объем заполнялся термометрической жидкостью при прогреве термометра от 0 до 290 °С.

Только при дальнейшем нагреве термометра термометрическая жидкость попадает в измерительную часть капилляра. Длина этой измерительной части составит всего 10 мм. Подобные термометры широко распространены на практике.

Расширение капилляра делают и в верхней части термометра. Это расширение служит для сбора термометрической жидкости при нагреве термометра выше предельной температуры, вернее, выше верхнего предела шкалы.

Ртутные термометры применяются для измерения температур до 500 °С.

Для обычных лабораторных и технических измерений используются лабораторные и технические термометры. Цена деления шкалы лабораторных термометров, применяемых на АЭС, обычно составляет: 0,1; 0,5; 1 °С.

При точных измерениях температуры ртутным термометром нужно учитывать поправки, вызванные тем, что конструкция и материалы, из которых изготовлены термометры, неидеальны.

Например, стеклянный баллон, в котором содержится термометрическая жидкость, не всегда сохраняет свой объем постоянным. Здесь наблюдаются явления старения стекла – любой стеклянный сосуд после изготовления меняет свой объем сначала быстрее, затем медленнее.

При изготовлении термометров этот эффект учитывают и стекло подвергают искусственному старению, но небольшое изменение объема баллона может происходить и после искусственного старения, а даже небольшое изменение объема приведет к значительному смещению уровня жидкости в капилляре термометра и к искажению показаний.

Допустимая погрешность показаний лабораторных термометров с ценой деления 0,1 составляет $\pm 0,2$ °С при шкале до 100 °С и $\pm 0,8$ °С –

при шкале до 300 °С. Эта допустимая погрешность обычно удовлетворяет практическим требованиям.

Если при измерениях термометр находится в таких же условиях, как при поверке, то для определения действительной температуры достаточно ввести поправку, указанную в свидетельстве, и поправку на смещение нулевой точки.

К недостаткам жидкостных термометров следует отнести большую тепловую инерцию. Из-за нее жидкостные термометры непригодны для измерения температур в быстропротекающих процессах.

Разновидностью жидкостных термометров являются *электроконтактные ртутные термометры*, применяемые для регистрации температуры или сигнализации о нарушении заданного температурного режима (рис. 3).

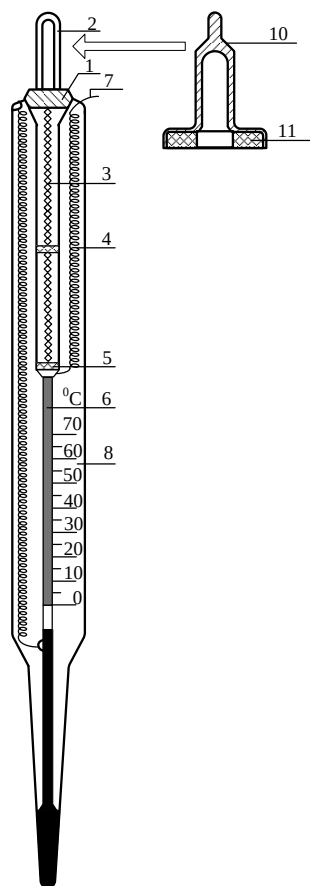


Рис. 3. Электроконтактный ртутный термометр:

- 1 – втулка, 2 – сердечник, 3 – винт, 4 – гайка с закрепленным на нем подвижным контактом, опорный вкладыш, 6 – подвижный контакт, 7 – выводы контактов, 8 – шкала, 9 – ртуть, 10 – пластмассовый кожух, 11 – магнитный сердечник, 12 – неподвижный контакт.

Платиновые контакты, впаянные в нижнюю часть капилляра, соединены с медными проводниками, которые через реле включены в цепь электрического нагревателя либо сигнализации.

Столбик ртути, поднимаясь в капилляре до определенного уровня, замыкает электрические контакты, установленные на этом уровне.

Контакты соединены с реле, с помощью которого включается сигнальная или регулирующая аппаратура.

При использовании подобных термометров следует обратить внимание на допустимую силу тока или допустимое напряжение, при которых могут работать контакты.

Если ток или напряжение выше допустимых, может произойти разрушение термометра.

2.2.1. Манометрические термометры

Принцип действия манометрических термометров основан на зависимости давления жидкости, газа или пара в замкнутом объеме от температуры. Манометрический термометр (рис. 4) состоит из термобаллона 1, капилляра 2, и манометрической пружины 3, связанной со стрелкой 5 тягой 4.

Термобаллон термометра погружается в измеряемую среду и рабочее вещество, находящееся в термобаллоне, принимает температуру измеряемой среды. При повышении температуры давление рабочего вещества повышается, что передается через гибкий капилляр на манометр.

Манометрические термометры изготавливают для измерения температур в диапазоне от минус 200 до 600 °С. Термометры со специальным заполнителем имеют диапазон до 1000 °С.

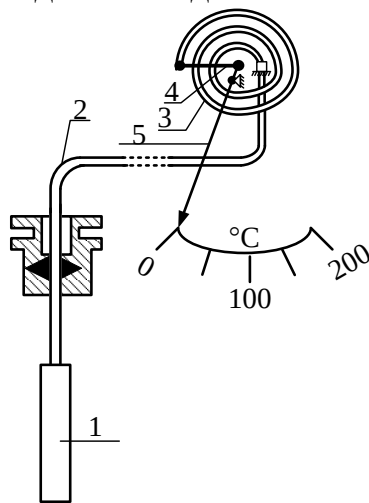


Рис. 4. Манометрический термометр

В зависимости от вида рабочего вещества манометрические термометры разделяются на газовые, жидкостные и конденсационные.

Газовые манометрические термометры предназначены для измерения температуры в диапазоне от минус 200 до 600 °С. В качестве рабочего вещества применяют азот. Зависимость давления газа от температуры при постоянном объеме описываются линейным уравнением:

$$P_1 = P_0(1 + \beta t), \quad (13)$$

где $\beta = 1/273$ – температурный коэффициент расширения газа.

Термометр имеет погрешность за счет влияния изменения температуры окружающей среды капилляра и манометрической пружины, вызывающей изменение давления газа в системе. Для уменьшения погрешности увеличивают объем термобаллона и уменьшают объем капиллятора и манометрической пружины. Длина термобаллона не превышает 400 мм, а диаметр – 30 мм. Длина капилляра составляет 0,6–60 м.

Жидкостные манометрические термометры предназначены для измерения температуры в диапазоне от минус 150 до 300 °С. Рабочее вещество: ртуть, спирт и др. Жидкость в отличие от газа практически несжимаема, поэтому изменение объема рабочей жидкости в термобаллоне при изменении температуры приводит к изменению объема манометрической пружины за счет изменения угла изгиба.

В жидкостных манометрических термометрах имеет место гидростатическая погрешность за счет различного уровня расположения термобаллона и измерительного прибора. Допускаемые перепады по высоте указываются в инструкциях по эксплуатации приборов.

Конденсационные манометрические термометры предназначены для измерения температур от минус 50 до 300 °С. Термобаллон на 3/4 заполнен низкокипящей жидкостью, а остальная часть заполнена насыщенным паром этой жидкости.

В качестве рабочей жидкости применяются фреон-22, ацетон, пропилен и др. Капилляр и манометрическая пружина заполняются другой жидкостью. Изменение температуры приводит к изменению давления насыщенного пара.

На рис. 5 приведена схема устройства манометрического конденсационного термометра, который содержит термобаллон 1, погружаемый в контролируемую среду, капилляр 2, манометрическую пружину 3, тягу 4, пружинку 5 и стрелку 6.

Манометрическая пружина может иметь овальное сечение или сечение со средним пережатым участком, что повышает механическую прочность пружины. Термобаллон частично заполнен конденсатом, на

0,7–0,75 объема баллона. Над баллоном находится насыщенный пар этой жидкости.

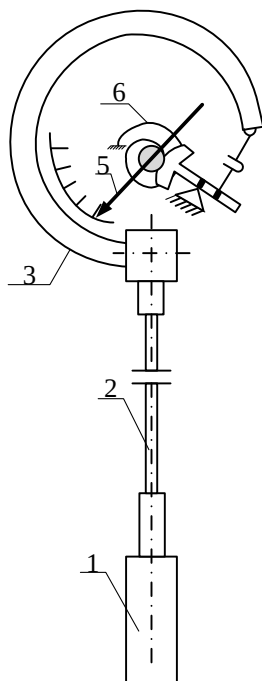


Рис. 5. Манометрический конденсационный термометр

В связи с тем, что давление в системе зависит только от измеряемой температуры, на показания термометра не оказывает влияния температура окружающей среды.

Манометрические термометры имеют простую конструкцию. Они могут применяться в пожароопасных и взрывоопасных условиях. Недостатками таких приборов являются ограниченное расстояние дистанционной передачи и возможность разгерметизации системы.

2.3. Термометры сопротивления

2.3.1. Принцип действия термометров сопротивления

В атомной промышленности для измерения температур до 800 °С применяются термометры сопротивления (ТС), принцип действия которых основан на использовании зависимости электрического сопротивления вещества от температуры. По вышеуказанной зависимости термометра судят о температуре среды, в которую он погружен. Выходным параметром устройства является электрическая величина сопротивления, которая может быть измерена с весьма высокой точностью (до 0,02 °С) и непосредственно использована в системах автоматического контроля и регулирования.

Зависимость электрического сопротивления термопреобразователя от температуры в определенном температурном диапазоне может быть выражена линейным уравнением:

$$R_t = R_0 \cdot (1 + \alpha \cdot t); \quad t = \frac{R_t - R_0}{\alpha \cdot R_0}, \quad (14)$$

где R_t – электрическое сопротивление металлического проводника при температуре t ;

R_0 – сопротивление того же проводника при нулевой температуре;

α – температурный коэффициент термометра сопротивления.

Таким образом, чтобы определить температуру газа или жидкости, необходимо знать коэффициент электрического сопротивления материала, из которого изготовлен чувствительный элемент, а также сопротивление термопреобразователя при нулевой и измеряемой температуре.

Линейная зависимость электрического сопротивления от температуры удобна тем, что позволяет использовать более простые схемы измерения и создавать более простые вторичные приборы. Такой зависимостью обладают термометры сопротивления, изготовленные из меди в интервале температур от минус 50 до 100 °С. Температурный коэффициент для меди равен 0,00428 1/°С.

К сожалению, в большом температурном диапазоне зависимость электрического сопротивления от температуры для многих металлов несколько отличается от линейной. Для чистой платины ($\alpha=0,00385$ 1/°С), например, в диапазоне температур от 0 до 850 °С зависимость сопротивления от температуры выражается квадратичным уравнением:

$$R_t = R_0 \cdot (1 + 3,97 \cdot 10^{-3} t - 5,8 \cdot 10^{-7} t^2). \quad (15)$$

В этом случае нелинейность небольшая и сказывается лишь при высоких температурах. Например, при температуре $t=100$ °С третий, нелинейный член уравнения составляет всего 0,416 % суммы остальных слагаемых, а при температуре $t=500$ °С этот член составляет 4,88 %.

При применении в качестве чувствительного элемента в термопреобразователе сопротивления вещества с нелинейной температурной зависимостью приходится учитывать эту нелинейность при градуировке термометра.

2.3.2. Чувствительность термометров сопротивления

Чувствительностью термометра сопротивления является величина характеризующая изменения его электрического сопротивления при

изменении измеряемой температуры на $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ или на $1\text{ }^{\circ}\text{K}$. Электрическое сопротивление термосопротивления при температуре t_1 и t_2 определяется уравнениями:

$$R_1 = R_0 \cdot (1 + \alpha \cdot t_1); R_2 = R_0 \cdot (1 + \alpha \cdot t_2). \quad (16)$$

Вычитая первое уравнение из второго, найдем величину изменения сопротивления термометра соответствующее указанному изменению температур:

$$\Delta R = R_2 - R_1 = R_0 \cdot \alpha \cdot \Delta t. \quad (17)$$

Отсюда получаем, что чувствительность термометра сопротивления пропорциональна его температурному коэффициенту α и электрическому сопротивлению при температуре $0\text{ }^{\circ}\text{C}$:

$$\frac{\Delta R}{\Delta t} = \alpha \cdot R_0. \quad (18)$$

Как видно из уравнения (18), чувствительность термопреобразователя будет выше, если у материала, из которого изготовлен чувствительный элемент термометра, будет большой температурный коэффициент электрического сопротивления и большое электрическое сопротивление.

Учитывая, что сопротивление термопреобразователя определяется в свою очередь геометрическими характеристиками провода, применяемого для его изготовления:

$$R_0 = \rho \cdot \frac{l}{s}, \quad (19)$$

то чувствительность термометра сопротивления будет определяться следующими параметрами:

$$\frac{\Delta R}{\Delta t} = \alpha \cdot \rho \cdot \frac{l}{s}. \quad (20)$$

Таким образом, из вышеприведенного уравнения следует, что увеличение чувствительности термометра сопротивления можно достичь путем уменьшения диаметра провода и увеличения его длины. Уменьшение диаметра проволоки ограничено технологическими и эксплуатационными соображениями. Чем тоньше проволока, тем труднее ее изготовить.

Важным препятствием для изготовления очень тонких проводов является это то, что они разрушаются от коррозии, либо от механического воздействия внешней среды. Свойства материала должны быть стабильными для того, чтобы зависимость сопротивления от температуры не менялась со временем.

По той же причине материал должен быть химически инертным, не окисляться и не взаимодействовать с окружающей средой. Материал чувствительного элемента термопреобразователя сопротивления должен быть таким, чтобы его свойства были легко воспроизводимы.

К материалам, удовлетворяющим вышеприведенным требованиям, относятся металлы: платина, медь, никель. Металлы имеют невысокие положительные температурные коэффициенты сопротивления (примерно $0,005 \text{ 1/}^{\circ}\text{C}$). Это означает, что при повышении температуры на 1°C электрическое сопротивление металлического проводника увеличивается примерно на 0,5 %.

Для изготовления термопреобразователей сопротивления, применяемых при высоких температурах, используют платину, а для низкотемпературных термопреобразователей используют медь, несмотря на ее малое удельное электрическое сопротивление.

Этим материалам отдают предпочтение перед другими благодаря тому, что платина и медь могут быть получены химически чистыми, вследствие чего показания термометров хорошо воспроизводятся. Чем чище металл, тем выше его электрическое сопротивление и тем выше температурный коэффициент электрического сопротивления.

Медь при высоких температурах окисляется кислородом воздуха, поэтому ее используют при низких температурах (до 180°C) или в атмосфере инертных газов. Платина не окисляется при работе в воздушной или окислительной среде при высоких температурах. Платину применяют для изготовления термопреобразователей сопротивления, работающих в окислительной среде до 850°C .

Главное преимущество термометров сопротивления – широкий диапазон температур, высокая стабильность, близость характеристики к линейной зависимости, высокая взаимозаменяемость.

2.3.3. Типы термопреобразователей сопротивления

По назначению термопреобразователи сопротивления делятся на эталонные, образцовые и рабочие. Рабочие термопреобразователи в свою очередь подразделяются на лабораторные и технические. Кроме того, термопреобразователи сопротивления делятся на низкоомные и высокоомные.

Высокоомные термопреобразователи имеют большие размеры чувствительного элемента и большую инерционность, но зато имеют большую чувствительность, что позволяет применять для измерения их сопротивлений более простую аппаратуру.

Эталонные термопреобразователи сопротивления служат для воспроизведения и передачи температурной шкалы. Их градуируют по определенным постоянным точкам (тройная точка воды, точка кипения воды, температура затвердевания цинка и т.д.).

Образцовые термопреобразователи сопротивления служат для передачи температурной шкалы приборам низшего разряда. Они применяются так же, как лабораторные приборы при измерениях повышенной точности.

Платиновые технические термопреобразователи имеют обозначение ТСП, медные – ТСМ, а никелевые соответственно ТСН.

Устройство типового термопреобразователя показано на рис. 6.

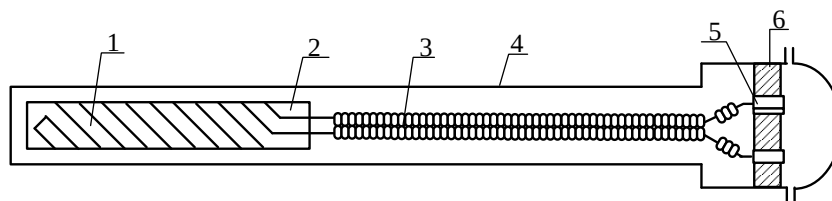


Рис. 6. Термометр сопротивления

Чувствительным элементом термометра сопротивления является металлическая проволока 1, намотанная на каркас 2. Каркас обычно изготавливается из электроизоляционных материалов – керамики, кварца, слюды. Проволока подключена к клеммам 5 с помощью токоподводов 3. Токоподводы делают из материала, который должен быть химически стойким и не создавать значительную ЭДС в паре с измерительными проводами. Для низких температур используют медь и серебро, для высоких – золото и платину. Токоподводы присоединяются к проводам чувствительного элемента сваркой. Клеммы 5 служат для подключения электрических проводов, соединяющих термопреобразователь сопротивления с измерительным прибором. Защитный чехол 4 и корпус головки 6 термопреобразователя предохраняют чувствительный элемент и токоподводы от внешних воздействий.

Материал оболочки должен быть прочным, выдерживать механические напряжения, выдерживать химическое воздействие окружающей среды, кроме того, он должен быть стойким при высоких температурах, чтобы при нагревании из него не выделялись вещества, способные загрязнить чувствительный элемент термопреобразователя. Обычно оболочку изготавливают металлической. Воздействие окружающей среды на термопреобразователи, работающие на АЭС, имеет свои особенности из-за того, что в районе реактора всегда существует ионизирующее излучение. Это излучение может способствовать коррозии термометров

сопротивления, а также изменять их температуру, так как часть излучаемой энергии, поглощаясь элементами термопреобразователя, превращается в теплоту. Поэтому термометры сопротивлений применяют для измерения температуры на АЭС везде кроме активной зоны атомного реактора.

2.3.3. Мостовые схемы подключения термометров сопротивления

Измерение температуры термопреобразователями сопротивления сводится к измерению электрического сопротивления чувствительного элемента. В качестве вторичных преобразователей, работающих с термопреобразователями сопротивления, применяют электрические мосты.

Электрическая мостовая схема показана на рис. 7. Она состоит из четырех резисторов (плеч ab , bc , cd , da), образующих две параллельные ветви: abc и adc . Точки b и d соединяются через гальванометр. К точкам a и c подключен источник питания.

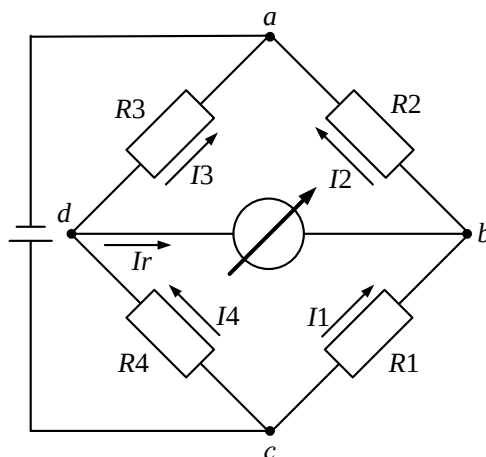


Рис. 7. Электрический мост

Мостовые схемы используют в уравновешенном и неуравновешенном режимах. Мост считается уравновешенным тогда, когда сопротивления его резисторов подобраны таким образом, что разность напряжений между точками b и d равна нулю. При этом ток в цепи гальванометра отсутствует. Если ток гальванометра $I_r=0$, то ток, текущий через плечо be , равен току, текущему через плечо ab : $I_1=I_2$ и соответственно $I_3=I_4$.

Напряжения на плечах моста равны:

$$U_1 = I_1 R_1; U_2 = I_2 R_2; U_3 = I_3 R_3; U_4 = I_4 R_4. \quad (21)$$

Если ток в цепи гальванометра отсутствует, то $U_1 = U_4$ и $U_2 = U_3$. Отсюда следует, что для уравновешенного моста:

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{R_1}{R_2}; \quad \frac{U_4}{U_3} = \frac{R_4}{R_3} = \frac{U_1}{U_2}, \quad (22)$$

т.е. мост может быть уравновешен при условии:

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_4}{R_3}. \quad (23)$$

Из условия равновесия моста следует, что с его помощью можно определить сопротивление любого плеча, если известно либо сопротивление остальных трех плеч, либо сопротивление одного из прилегающих плеч и отношение сопротивлений двух других плеч:

$$R_1 = \frac{R_2 \cdot R_4}{R_3}. \quad (24)$$

Итак, мост называется уравновешенным, когда сопротивления его плеч таковы, что ток в цепи гальванометра равен нулю. Такое равновесие моста можно получить двумя способами. Можно изменять сопротивление одного из плеч моста, а можно изменять отношение сопротивлений двух плеч.

На рис. 8 показана электрическая схема моста с переменным сопротивлением плеча. На этой схеме показано, что в качестве резистора R_1 в плечо bc моста включены термопреобразователь сопротивления, имеющий сопротивление R_T , и подводящие провода, имеющие сопротивление $R_{\text{п}}$, тогда $R_1 = R_T + R_{\text{п}}$.

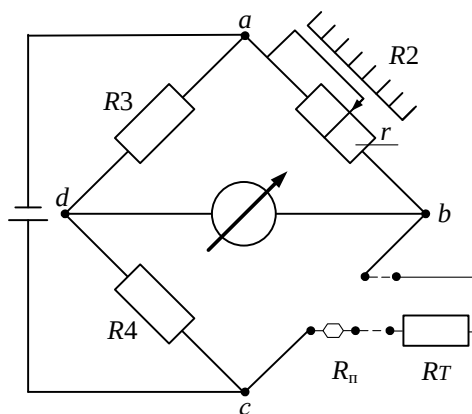


Рис. 8. Электрическая схема моста с переменным сопротивлением плеча

В простейших уравновешенных мостах положение движка переменного резистора R_2 связано с указателем шкалы, отградуированной в единицах сопротивления или в единицах температуры. В этом случае определенному значению R_T соответствует вполне определенное положение движка резистора R_2 и указателя. И если на шкале в месте расположения указателя нанести соответствующее значение сопротивления

R_T , а в других точках шкалы – остальные значения сопротивления R_T то получим прибор, с помощью которого очень просто определить значение R_T . Для этого достаточно найти такое положение движка резистора R_2 , при котором ток через гальванометр не течет, и отметить искомое значение сопротивления R_T на шкале прибора.

Как видно из (24), сопротивление термопреобразователя с учетом сопротивления соединительных проводов будет определяться уравнением:

$$R_1 = R_T + R_{\text{п}} = \frac{R_2 \cdot R_4}{R_3}; \quad R_T = \frac{R_2 \cdot R_4}{R_3} - R_{\text{п}}. \quad (25)$$

Как следует из выражения (25) для точного измерения сопротивления сенсорного элемента с помощью мостового преобразователя необходимо учитывать сопротивление подводящих проводов от датчика к преобразователю.

В некоторых случаях приходится применять для подключения термопреобразователей сопротивления длинные соединительные провода, электрическое сопротивление которых значительно.

Если к тому же температура этих проводов изменяется со временем из-за колебаний температуры окружающей среды или под действием ионизирующих излучений реактора АЭС, то сопротивление проводов будет меняться, и это изменение сопротивления будет влиять на показания прибора, если провода вместе с термометром включены в измерительное плечо моста.

Для уменьшения влияния сопротивления подводящих проводов на баланс мостовой схемы используются трехпроводная схема подключения термопреобразователей сопротивления.

На рис. 9 показана трехпроводная схема подключения термопреобразователя сопротивления.

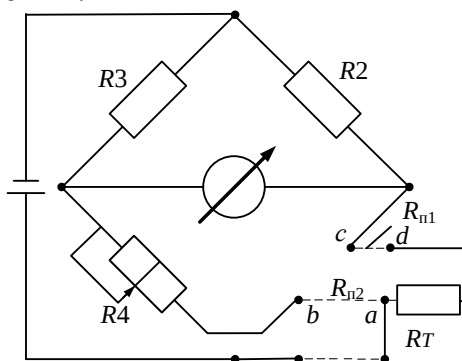


Рис. 9. Трехпроводная схема подключения термопреобразователя сопротивления

Как видно из рис. 10, один конец цепи питания подключен непосредственно к чувствительному элементу. На рис. 10 это точка *a*.

Соединительные провода при такой схеме включены в разные плечи моста. Уравнение равновесия моста будет выглядеть следующим образом:

$$\frac{R_T + R_{\text{п1}}}{R_2} = \frac{R_4 + R_{\text{п2}}}{R_3}. \quad (26)$$

Видно, что $R_T = R_4$ при условии, что $R_{\text{п1}} = R_{\text{п2}}$ и $R_2 = R_3$. Мост, в котором сопротивления соседних плеч равны друг другу, называется симметричным.

Итак, если соединительные провода одинаковы по материалу и конструкции и уложены близко один к другому, то изменение их сопротивлений будет происходить одинаково и одновременно. А, так как они включены в соседние плечи моста, то их влияние будет взаимно компенсироваться, поскольку мост симметричный.

2.4. Термоэлектрические преобразователи (термопары)

2.4.1. Принцип действия термоэлектрического преобразователя

В 1821 году берлинский учёный член Берлинской Академии наук Зеебек (1770–1831 гг.) решил воспроизвести опыт Эрстеда по воздействию постоянного электрического тока на магнитную стрелку. Но источником тока была не гальваническая батарея, а сухой без какого-либо электролита контакт двух металлов.

Зеебек установил, что магнитная стрелка реагировала только в тот момент, когда экспериментатор прикасался к месту контакта руками. Причём не играло никакой роли, были ли руки сухими или влажными. Эффект отсутствовал даже в том случае, когда контакт сжимался руками через влажную бумагу. Но при сжатии через стекло или металл стрелка отклонялась.

Проведя многочисленные эксперименты, Зеебек убедился, что суть явления в тепле рук, которыми этот контакт сжимался. Поэтому этот эффект был назван термомагнитным. Эти эксперименты были вскоре подтверждены Эрстедом и Фурье. Выяснилось, что элемент Зеебека не только создаёт магнитное поле, но и способен разлагать химические соединения. Этим он уподобляется химическому источнику тока. Поэтому это явление было названо термоэлектричеством.

Однако сам первооткрыватель этого явления с таким толкованием не соглашался. Сам он занимался теорией земного магнетизма, а этот

феномен он объяснял разностью температур между экватором и земными полюсами. В этих экспериментах учёный видел подтверждение своей точки зрения. Он считал, что именно токи, возникающие вследствие открытого им эффекта, порождают магнитное поле.

Надо отдать должное берлинскому профессору. Он сам, проведя множество экспериментов, накопил массу неопровержимого материала, который не только заставил его отказаться от своей гипотезы, но и предоставил науке много новых фундаментальных данных.

Зеебек достиг немалых результатов в физической оптике, физической химии и других науках, но известность учёному принес вышеописанный эффект, носящий его имя.

Таким образом, если соединить два провода из разнородных металлов, то между их концами возникнет электродвижущая сила величинной порядка милливольт, с температурным коэффициентом около 50 мкВ на градус.

Такие соединения называются термопарами и используются для измерения температуры в диапазоне от минус 270 до 2500 °С. Зависимость напряжения от температуры нелинейна, однако в небольшом диапазоне температур термоЭДС пропорциональна разности температур спаев T_1 и T_2 :

$$E = S \cdot (T_2 - T_1), \quad (27)$$

где S – коэффициент Зеебека.

Строгий вывод термоЭДС достаточно сложен. Возникновение термоЭДС на качественном уровне объясняется тем, что в проводниках (металлах и сплавах) имеются свободные электроны, т.е. такие электроны, которые не связаны постоянно с атомом. Количество свободных электронов в единице объема в разных проводниках неодинаково. Электроны можно представить себе в виде газа, заполняющего межатомное пространство.

Неодинаковую плотность электронов можно представить как разное давление электронного газа, т.е. в одном проводнике электронный газ находится как бы под одним давлением, а в другом – под другим давлением.

И когда соединяют проводники друг с другом, то электроны получают возможность проникать из одного проводника в другой. Естественно, что из проводника с большим давлением электронного газа будет выходить больше электронов, чем из проводника, где давление меньше. Поэтому один металл (с большим давлением) будет после соединения заряжаться положительно, а другой – отрицательно.

Появившаяся в результате перехода электронов разность зарядов будет противодействовать дальнейшему переходу электронов. Устанавливается равновесие, при котором поток электронов от одного металла к другому прекращается.

Это равновесие соответствует определенной разности потенциалов, которую и называют термоЭДС. А, так как давление электронного газа зависит от температуры, то и термоЭДС тоже будет зависеть от температуры.

Если оба спая термоэлемента находятся при одной и той же температуре, то контактные разности потенциалов равны и направлены в противоположные стороны, то есть компенсируют друг друга. Если же температура спаев различна, то будут неодинаковы и внутренние контактные разности потенциалов. Это ведет к нарушению электрического равновесия и возникновению контактной термоЭДС. Именно поэтому, если спаи термопары поддерживать при различных температурах, в цепи возникает термоЭДС, и если цепь замкнута, то по ней течет ток.

Рабочий конец термопары, помещаемый в измеряемую среду, называют горячим спаем, а свободный (нерабочий) – холодным. Названия «горячий» и «холодный» спай условны. Горячий спай может находиться и при низкой температуре, но он называется горячим, если температура холодного спае еще ниже.

Отметим еще одну условность. Из двух разнородных проводников (их еще называют термоэлектродами) один называется термоположительным, а второй – термоотрицательным. За положительный принято считать горячий электрод, от которого течет ток, а отрицательным называют холодный электрод, в который втекает ток.

При обозначении термопары принято называть ее по материалам термоэлектродов, причем первым называют материал термоположительного термоэлектрода, а вторым – термоотрицательного.

Например, хромель-алюмелевая термопара состоит из термоположительного электрода, изготовленного из сплава хромель, и термоотрицательного электрода из сплава алюмель. Если соединить друг с другом хромелевую и алюмелевую проволоку, то получится хромель-алюмелевая термопара.

Если же электрическую цепь разорвать, то тока не будет, а в месте разрыва возникнет разность потенциалов, равная разности контактных термоЭДС. Эта разность потенциалов не зависит от положения разрыва в электрической цепи.

Например, хромель-алюмелевая термопара, горячий и холодный спаи которой находятся соответственно при 100 °С и 0 °С, разовьет

термоЭДС, равную $4,1 \cdot 10^{-3}$ В. Медь-константановая термопара в аналогичных условиях разовьет термоЭДС в 4,16 мВ, а платино-платинородиевая – в 0,64 мВ.

2.4.2. Законы термоэлектрических цепей

При разработке электрических цепей для измерения температуры термопарами учитывают три основных закона термоэлектрической цепи:

- закон однородной цепи;
- закон неоднородной цепи;
- закон промежуточных температур.

Закон однородной цепи утверждает, что алгебраическая сумма термоЭДС в цепи, выполненной из одного однородного металла, равна нулю и не зависит от распределения температуры вдоль проводника. На термоЭДС не влияет также сечение проводника. Термоэлектроды и провода могут быть любой толщины, если сохраняется их однородность.

Большое значение имеют знание и использование закона однородной цепи в практических условиях. Следует помнить, что электрическую цепь термопары нужно прокладывать таким образом, чтобы проводники были однородными в тех зонах, где вдоль пути проводника имеются большие температурные неравномерности. И чем более однороден проводник, тем большие температурные неравномерности можно допустить без опасения появления дополнительной неконтролируемой термоЭДС.

Неоднородность термоэлектродов, изготовленных из сплавов, может возникать из-за неравномерного распределения компонентов сплава по длине и сечению проводника. Неравномерное распределение получается в процессе изготовления термоэлектродной проволоки при отливке заготовки, при волочении. Неравномерность распределения компонентов сплава в проволоке может возникать и в процессе эксплуатации термоэлектродов, особенно при эксплуатации в химически активной среде при высокой температуре.

Это может происходить из-за того, что компоненты обычно имеют неодинаковую химическую стойкость, и некоторые из них могут вступать в химическое взаимодействие со средой, например окисляться.

Некоторые термоэлектроды под механическим воздействием при сжатии или растяжении приобретают физическую неоднородность. Ме-

таллы в отпущенном состоянии обычно имеют иное значение термоЭДС, чем в закаленном.

Свойство неоднородного проводника, помещенного в неоднородное температурное поле, создавать термоЭДС широко используют также для проверки однородности проводов и термоэлектродов. При такой проверке исследуемый отрезок проводника или термоэлектрода подключают двумя концами к электроизмерительному прибору. Затем проводник или термоэлектрод подвергают неравномерному нагреву.

Перемещая нагревательный элемент вдоль всего отрезка проводника и следя при этом за показаниями электроизмерительного прибора, устанавливают качественность исследуемого отрезка проводника или термоэлектрода.

Закон неоднородной цепи устанавливает, что алгебраическая сумма термоЭДС в цепи, составленной из различных металлов, равна нулю, если вся цепь находится при одной и той же температуре. Этот закон относится и к неоднородным проводникам. Практическое использование закона промежуточных металлов сводится к такому устройству схем, которое обеспечивает постоянство (однородность) температур в тех областях, где термоэлектроды или провода неоднородны.

Первый пример – спай термопары неоднороден по сечению, поэтому желательно поместить спай в такие условия, чтобы температура в нем была одинакова по сечению. Другими словами, если размеры спаи настолько малы, что температура внутри спаи одинакова во всех точках, то способ изготовления спаи (пайка, сварка, скрутка) не влияет на термоЭДС.

Второй пример – электрический переключатель термопар, как правило, содержит детали из неодинаковых металлов и сплавов, поэтому весь он должен находиться при одной и той же температуре.

Закон промежуточных температур состоит в том, что термоЭДС, возникающая в термопаре, изготовленной из различных однородных металлов, спаи которой находятся при температурах t_1 и t_3 , является алгебраической суммой термоЭДС двух термопар, выполненных из тех же металлов, холодные спаи которых находятся соответственно при температурах t_1 и t_2 и при температурах t_2 и t_3 .

Например, для хромель-алюмелевой термопары, спаи которой находятся при температуре 0°C и 200°C , термоЭДС равна 8,19 мВ. Для аналогичной термопары при температурах спаев 0°C и 100°C термоЭДС равна 4,1 мВ, а для режима с температурами 100°C и 200°C термоЭДС равна 4,09 мВ. Итак, алгебраическая сумма термоЭДС, возникающая в цепи, состоящей из нескольких однородных металлов,

зависит только от температуры спаев (и температуры тех мест цепи, где есть неоднородности). Поэтому если в данной цепи все спаи, кроме одного горячего (и места с неоднородностями), поддерживаются при постоянной температуре, то термоЭДС будет зависеть только от температуры этого горячего спая.

2.4.3. Алгоритм измерения температуры термопарами

Зависимость термоЭДС от температуры для конкретных термопар (градуировочную характеристику) получают опытным путем. Эту операцию называют градуировкой термопары. Во время градуировки горячий спай термопары нагревают до заданной температуры. Температуру холодного спая поддерживают постоянной, обычно равной $0\text{ }^{\circ}\text{C}$. С помощью измерительного прибора измеряют термоЭДС, соответствующую данному значению температуры. Затем изменяют температуру горячего спая и измеряют новое значение термоЭДС. По полученным значениям термоЭДС в зависимости от температуры горячего спая строят градуировочные графики или составляют таблицы. Пример подобного графика показан на рис. 10.

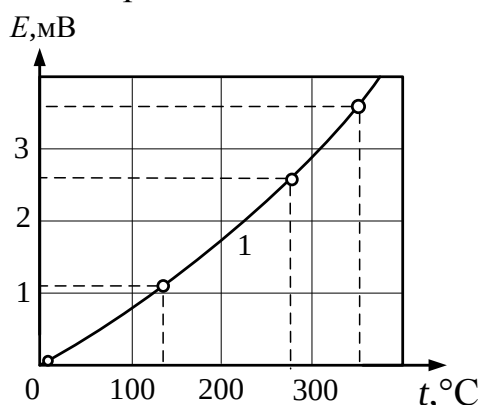


Рис. 10. Пример построения градуировочной кривой

Значения термоЭДС, соответствующие определенной температуре горячего спая, обозначены точками. По точкам проводится плавная кривая 1. Эта кривая и выражает зависимость термоЭДС от температуры для данной термопары.

С помощью подобного градуировочного графика можно легко определить температуру горячего спая, если известна термоЭДС, измеренная этой же термопарой во время измерений. Для этого достаточно известное значение термоЭДС отложить на оси ординат (точка 2 на рис. 11). Затем провести горизонтальную линию 3 до пересечения ее с градуировочной кривой 1. От точки пересечения линии 3 с градуиро-

вочной кривой нужно провести вертикальную линию 4 вниз. В точке пересечения этой линии с осью абсцисс (точка 5) найти искомое значение температуры.

Таким образом определяют значение температуры горячего спая, если холодный спай находится при нулевой температуре. Если же температура холодного спая не равна нулю, то термоЭДС горячего спая определяют с учетом термоЭДС холодного спая. Для этого по градуировочной кривой определяют значение термоЭДС E_x , соответствующее температуре холодного спая t_x (рис. 12).

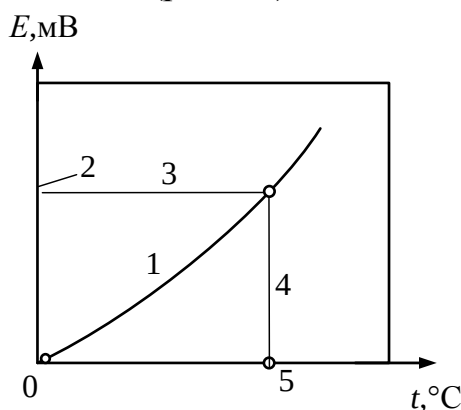


Рис. 11. Определение температуры горячего спая при нулевой температуре холодного спая

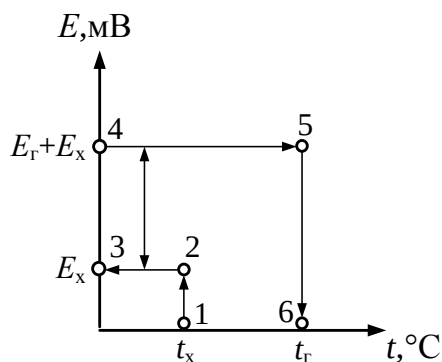


Рис. 12. Определение температуры горячего спая при температуре холодного спая, отличной от нуля

Величину E_x суммируют с термоЭДС термопары E_r холодные спай которой находятся при температуре t_x . По градуировочной кривой определяют температуру горячего спая термопары t_r .

На рис. 13 показана зависимость термоЭДС от температуры для некоторых термопар.

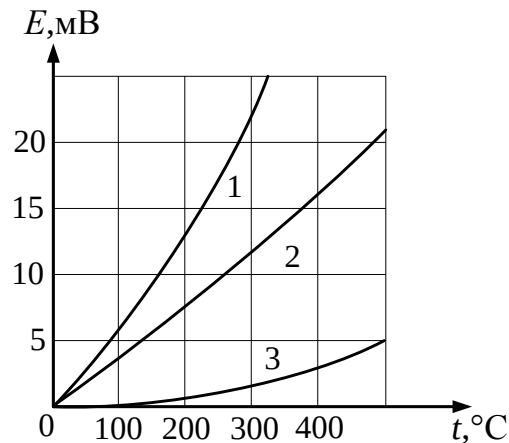


Рис. 13. Зависимость термоЭДС от температуры для различных термопар:
1 – хромель-копелевая; 2 – хромель-алюмелевая; 3 – платинородий-платиновая

Как видно из рис. 13, наибольшую термоЭДС развивает хромель-копелевая термопара, но зависимость наиболее линейна у хромель-алюмелевой термопары.

Иногда результаты градуировок термопар представляют не графически, а аналитически в виде алгебраических уравнений. Для линейной зависимости используется уравнение вида:

$$E = A \cdot t, \quad (28)$$

где A – постоянное для данной термопары число (например, для термопары хромель-алюмель $A = 4,1 \cdot 10^{-2}$ мВ/°С).

Для нелинейной зависимости иногда применяется квадратичное уравнение:

$$E = A \cdot t^2 + B \cdot t + C. \quad (29)$$

Значения постоянных коэффициентов определяются по результатам градуировок.

Таким образом, алгоритм измерения температуры термопарами должен состоять из следующих шагов:

- измерение температуры холодного спая;
- преобразование этой температуры в эквивалентное напряжение на выводах холодного спая термопары, используя градуировочную таблицу термопары или линеаризующее уравнение;
- добавление этого напряжения к измеренному напряжению на выводах термопары;
- преобразование полученного напряжения в температуру, используя градуировочную таблицу термопары или линеаризующее уравнение.

2.4.4. Конструкция термопар

Термопары можно изготовить тремя способами:

- скруткой проводов;
- сваркой проводов;
- спайкой концов проводов.

Провода можно просто скрутить, однако такое соединение ненадежно и имеет большой уровень шумов.

Сварка проводов, изготовленных из разных металлов, выполняется таким образом, чтобы получилось небольшое по размеру соединение – спай. Термопары, изготовленные сваркой, выдерживают более высокие температуры, однако химический состав термопары и структура металла в месте сварки могут нарушаться, что приводит к разбросу температурных коэффициентов термопар. Под действием высоких температур может произойти раскалибровка термопары вследствие изменения диффузии компонентов металла в месте сварки. В таких случаях термопару следует откалибровать заново или заменить.

Сварку металлов иногда заменяют пайкой, однако верхний температурный диапазон такой термопары ограничен температурой плавления припоя. При температурах, близких к температуре плавления припоя, контакт разнородных металлов в термопаре может нарушаться.

Конструкция термоэлектрических преобразователей зависит от условий их применения. На рис. 14 схематически показана типичная конструкция корпуса термоэлектрического преобразователя, предназначенного для измерения температуры жидкости или газа на промышленной установке. Гильза 1 служит для защиты горячего спая и термоэлектродов от механических повреждений и от воздействия измеряемой среды. Гильза прикрепляется к штуцеру 2, с помощью которого термопреобразователь устанавливается на трубопроводе или корпусе узла установки. В зависимости от условий работы – радиоактивности, температуры, давления и агрессивности среды – крепление термопреобразователя к трубопроводу бывает выполнено разъемным или неразъемным способом. В последнем случае гильзу приваривают к бобышке на трубопроводе. Около дна гильзы расположен горячий спай 8 термоэлектрического преобразователя, на противоположном конце гильзы укреплена защитная головка 3.

В головке помещается разъем 5 для подсоединения проводов к термоэлектродам. В этом случае головка имеет крышку 4 и патрубок 6. Через патрубок к разъему вводятся провода для подключения к внешней схеме. Для герметизации головки, чтобы в нее не попадала влага и

пыль, патрубков снабжается сальниковым уплотнением. Термоэлектроды 7, проходящие внутри гильзы от горячего спая 8 к головке, изолируются друг от друга и от гильзы электроизоляторами. В качестве электроизоляторов чаще всего используют фарфоровые трубки – одноканальные или двухканальные. Иногда свободное пространство между изоляторами и гильзой заполняется керамическим порошком.

Если горячие спаи термоэлектрических преобразователей электроизолированы от дна гильзы и не прикреплены к гильзе, то влияние промышленных помех в этом случае у них минимально, но зато сильно увеличивается инерционность показаний по сравнению с преобразователями, рабочий спай которых приварены к дну гильзы.

Рабочие концы термоэлектрических преобразователей, применяющихся для измерения локальной температуры, т.е. температуры в точке или в малом объеме, должны иметь малые габаритные размеры.

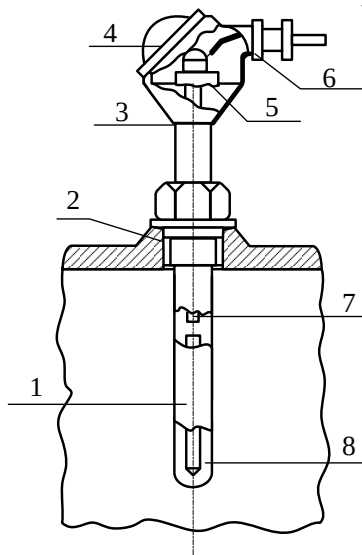


Рис. 14. Типичная конструкция корпуса термопары

Такие термопреобразователи устанавливаются в потоках жидкости или газа в тех случаях, когда важно знать не среднюю температуру потока, а температуру в определенном месте. Например, температуру теплоносителя на выходе из кассеты тепловыделяющих элементов ВВЭР-1000.

В настоящее время разработаны и широко применяются для измерения температур на атомных электростанциях и в исследовательских лабораториях термоэлектрические преобразователи, использующие специальные кабели. В России выпускают термопарный кабель двух типов КТМС-ХА и КТМС-ХК диаметров от 1 до 7,2 мм. Оболочка кабеля изготовлена из нержавеющей стали или жаростойкой стали или

сплава. Кабельная термопара представляет собой металлическую трубку с размещенными внутри нее параллельными термоэлектродами. Термоэлектроды термопары со стороны рабочего торца сварены между собой лазерной сваркой, образуя спай внутри стальной оболочки термопарного кабеля. Рабочий торец заглушен приваренной стальной пробкой. Свободные концы термоэлектродов подключаются к клеммам головки термопреобразователя или компенсационным проводам.

Применение кабельных термопреобразователей позволяет достичь преимуществ по сравнению с термопарами традиционного исполнения, таких как:

- повышенные в 2-3 раза термическая стабильность и рабочий ресурс при сравнимых рабочих условиях;
- возможность изгибать, укладывать в труднодоступные места, в кабельные каналы, приваривать, припаивать или просто прижимать к поверхности для измерения ее температуры, при этом монтажная длина может достигать 60-100 метров;
- малый показатель тепловой инерции, позволяющий применять их при регистрации быстропротекающих процессов;
- блочно-модульное исполнение термопреобразователей в защитных чехлах, обеспечивающее дополнительную защиту термоэлектродов от воздействия рабочей среды и возможность оперативной замены чувствительного элемента;
- универсальность применения в различных условиях эксплуатации.

При работе в потоках жидкости и газа движущихся с большой скоростью, а также при высоких давлениях и температурах, в агрессивных средах, кабельные термопреобразователи помещаются в защитные чехлы(гильзы) предохраняющие их от изгибов и разрушений, и служат в качестве сменных чувствительных элементов.

Защитные чехлы имеют типовые габаритные размеры. Внешний вид преобразователя аналогичен традиционному внешнему виду промышленных термопар.

2.4.5. Преимущества термоэлектрических преобразователей

Широкое применение термоэлектрических преобразователей на АЭС обусловлено следующими положительными свойствами:

- термоэлектрические преобразователи могут быть использованы для измерения температур в широком диапазоне от минус 200 до 1800 °С;

- термоэлектрические преобразователи позволяют проводить измерения температур с точностью до десятых долей градуса. В специальных случаях точность можно значительно повысить;
- термопреобразователи обладают простотой конструкции и могут быть изготовлены любых размеров. Так, например, микротермопары имеют толщину всего несколько десятых долей миллиметра и измеряют температуру в тонкостенных или малогабаритных деталях установок;
- достоинством термопреобразователей является возможность изготовления их малоинерционными. Это свойство термопреобразователей используется, например, при исследовании нестационарных тепловых процессов на быстрых реакторах типа БН-600;
- термопреобразователи удобно использовать в системах централизованного контроля, поскольку не требуется усиливать выходной сигнал термопары при передаче его по измерительному каналу в АСУ ТП;
- хромель-алюмелевые термопреобразователи хорошо переносят действие радиационного излучения. Обладают большим ресурсом работы в радиационном поле и поэтому с помощью ее осуществляют температурный контроль в активной зоне реактора.

3. ИЗМЕРЕНИЕ ДАВЛЕНИЯ

3.1. Основные понятия

Давление относится к числу наиболее распространенных физических величин во всех отраслях промышленности. На АЭС давление характеризует процессы и определяет режимы работы агрегатов. Давлением определяется толщина стенок, трубопроводов и других элементов оборудования.

Средства измерения давления в атомной энергетике составляют около половины общего количества средств измерения. На АЭС существуют специфические условия работы приборов измерения давления:

- широкий диапазон измерения 0,5–50 МПа;
- высокая температура в зоне контроля;
- радиоактивность измеряемой и окружающей среды;
- трудности осмотра и замены первичных преобразователей.

Единицей измерения давления в международной системе единиц (СИ) установлен Паскаль. Паскаль (Па) – давление силы в один Ньютон на площадь в один квадратный метр (Н/м^2). Существуют и другие единицы измерения давления. Соотношения между единицами приведены в таблице 3.

Таблица 3

Взаимосвязь различных единиц измерения давления

Единица давления	Коэффициент перевода				
	кгс/м ² или мм вод. ст	кгс/см ² или ат (техническая атмосфера)	атм (физическая атмосфера)	мм рт. ст	Па
1 кгс/м ² или 1 мм вод. ст	1	10^{-4}	$0,0969 \cdot 10^{-3}$	$73,556 \cdot 10^{-3}$	9,80665
1 кгс/см ² или 1 ат (техническая атмосфера)	10^4	1	0,9678	735,56	98066,5
1 атм (физическая атмосфера)	10332	1,0332	1	760	101325
1 мм рт. ст	13,6	$1,36 \cdot 10^{-3}$	$1,316 \cdot 10^{-3}$	1	133,322
1 Па	0,101	$10,2 \cdot 10^{-6}$	$10,13 \cdot 10^{-6}$	$7,5 \cdot 10^{-3}$	1

При измерении различают виды давления: абсолютное, избыточное и вакуумметрическое. Кроме того, давление движущейся среды характеризуется давлением статическим, динамическим и полным.

Существует также понятие атмосферного давления. Атмосферное (барометрическое) давление создается массой воздушного столба земной атмосферы.

Избыточное давление характеризуется превышением давления среды над атмосферным.

Вакуумметрическое давление (вакуум) – давление среды, недостающего до атмосферного.

Абсолютное давление среды равно сумме атмосферного и избыточного давления или разности атмосферного и вакуумного давления. Если избыточное или вакуумметрическое давления равны нулю, то абсолютное давление равно атмосферному.

Полное давление движущейся среды равно сумме статического и динамического давлений.

Статическое давление потока среды может быть избыточным или вакуумметрическим, может быть равно атмосферному.

Динамическое давление зависит от скорости потока по следующей формуле:

$$P_d = \frac{v^2 \cdot \rho}{2}, \quad (30)$$

где v – скорость движения вещества;

ρ – плотность вещества.

Измерение давления основывается главным образом на уравновешивании действующего усилия или при помощи столба жидкости, или за счет упругой деформации различных чувствительных элементов. Поэтому, по принципу действия приборы разделяются на жидкостные и деформационные.

3.2. Методы измерения давления

3.2.1. Жидкостные преобразователи давления

В жидкостных манометрах величиной, характеризующей измеряемое давление, служит высота уравновешивающего столба жидкости. В них используется принцип сообщающихся сосудов. Уровни рабочей жидкости совпадают при равенстве давлений над ними, а при неравенстве избыточное давление в одном сосуде уравновешивается гидростатическим давлением избыточного столба жидкости в другом.

Выпускаются однотрубные (чашечные) и двухтрубные (U-образные) манометры. В качестве рабочей жидкости используются дистиллированная вода, ртуть, этиловый спирт. Жидкостные манометры являются простыми и точными приборами. Применяются, главным образом, для лабораторных исследований и при наладочных работах.

Наиболее широко применяются двухтрубные жидкостные манометры. Их используют для измерения разности давлений (рис. 15).

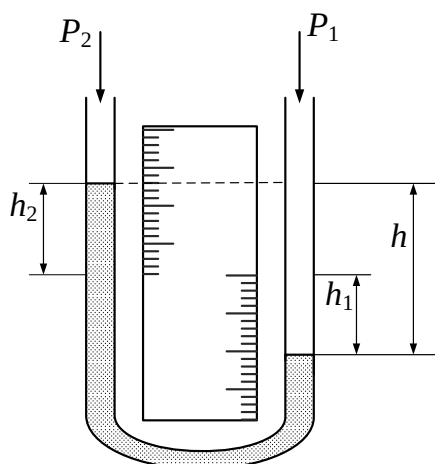


Рис. 15. U-образный манометр

Две вертикальные сообщающиеся стеклянные трубки закреплены на металлическом или деревянном основании, к которому прикреплена также шкальная пластинка. Трубки заполняются рабочей жидкостью до нулевой отметки.

В одну трубку подается измеряемое давление, а другая трубка сообщается с атмосферой. При измерении разности давлений к обеим трубкам подводится измеряемое давление.

Столб жидкости высотой h уравнивает разность давлений:

$$P_1 - P_2 = \rho \cdot g \cdot h; \quad h = \frac{1}{\rho \cdot g} (P_1 - P_2), \quad (31)$$

где g – местное ускорение свободного падения;

ρ – плотность рабочей жидкости.

Высота h столба определяется как сумма высот h_1 и h_2 . Местное ускорение свободного падения рассчитывается по формуле:

$$g = g_h \cdot [1 + 0,005302 \cdot \sin^2 \varphi - 7 \cdot 10^{-6} \sin(2\varphi)] - 3,085 \cdot 10^{-6} \cdot H, \quad (32)$$

где g – нормальное ускорение свободного падения, равное 9,78030;

φ – географическая широта;

H – высота над уровнем моря.

На рис. 16 показан чашечный (однотрубный) манометр.

Он состоит из цилиндрического сосуда и сообщающейся с ним измерительной стеклянной трубки. Площадь сечения сосуда значительно больше, чем измерительной трубки, поэтому при одном и том же давлении высота столба жидкости в трубе будет выше, чем в сосуде пропорционально разности сечений.

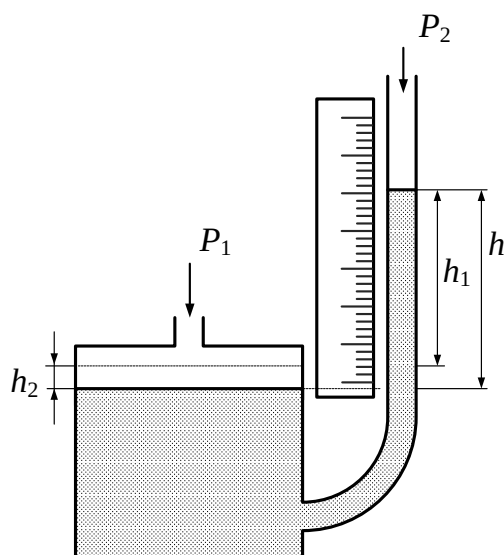


Рис. 16. Чашечный однотрубный манометр

При измерении разности давлений большее давление подается в сосуд, меньшее в измерительную трубку. Под действием разности давлений жидкость в измерительной трубке поднимется на высоту h_1 , а в широком сосуде опускается на высоту h_2 .

Тогда высота столба h , соответствующая измеряемой величине, определяется как сумма высот h_1 и h_2 .

3.2.1. Деформационные преобразователи давления

Принцип действия деформационных манометров основан на зависимости деформации упругого чувствительного элемента от измеряемого давления. Чувствительные элементы имеют специальную конструкцию, реализующую линейную зависимость перемещения рабочей точки от измеряемого давления.

Наиболее распространенные упругие элементы: трубчатые, пружинные, сильфоны, мембраны, вялые мембраны с жестким центром.

Простейшие упругие элементы: плоские и выпуклые мембраны (рис. 17).

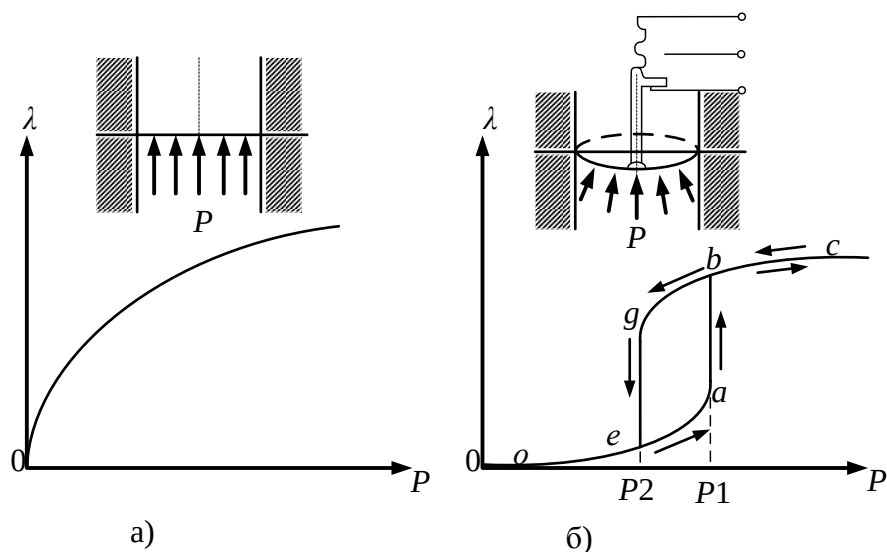


Рис. 17. Мембраны:
а – плоская, б – выпуклая.

Плоская мембрана (рис. 17,а) представляет собой круглую тонкостенную пластину постоянной толщины. Они изготавливаются из стали и бронзы. Мембраны заделаны по краям в корпус камеры и при повышении давления претерпевают деформацию. Деформация имеет небольшую величину. Мембраны обладают малой инерционностью. Они применяются с преобразователями, не требующими больших перемещений: пьезоэлектрическими, тензорезисторными, емкостными.

Выпуклые (хлопающие) мембраны (рис. 17,б) используются в реле давления для сигнализации превышения давления.

В дифференциальных манометрах, тяго- и напорометрах часто применяются неметаллические, неупругие (вялые) мембраны с жестким центром (рис. 18).

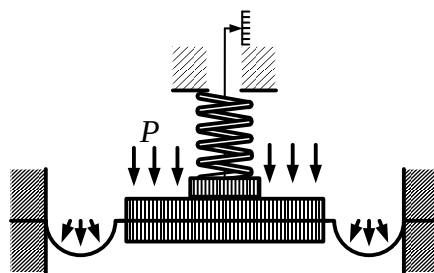


Рис. 18. Мембрана с жестким центром

Они изготавливаются из агрессивно стойких материалов: капрона, пластмассы, резины. Они снабжаются жестким центром, составляющим примерно 0,8 рабочего диаметра. Для обеспечения постоянства эффективной площади кольцевая часть мембраны снабжена гофром.

Жесткость (упругость) мембраны обеспечивается пружиной, рассчитанной на величину измеряемого давления.

Сильфон представляет собой тонкостенную трубку с поперечной гофрировкой (рис. 19).

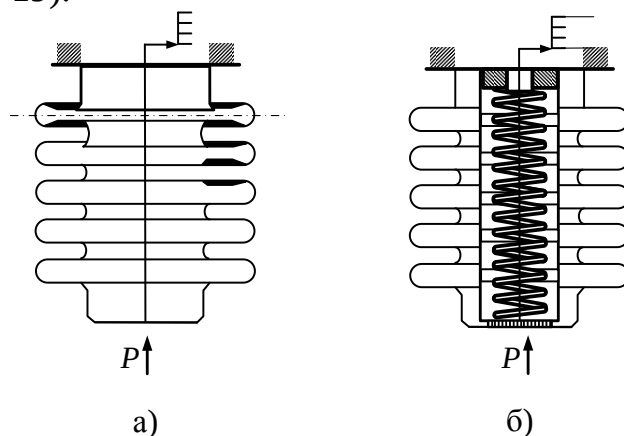


Рис. 19. Сильфон
а – без пружины, б – с пружиной

Они применяются для измерения сравнительно небольшого давления. Жесткость сильфона зависит от его материала и геометрических параметров. В тех случаях, когда необходимо увеличить жесткость, его снабжают винтовой цилиндрической пружиной.

Трубочные манометры основаны на свойстве трубчатых пружин деформироваться под действием внутреннего давления. Трубчатые пружины изготавливаются в виде одновитковых, согнутых по дуге трубок эллиптического и плоскоовального сечения (рис. 20).

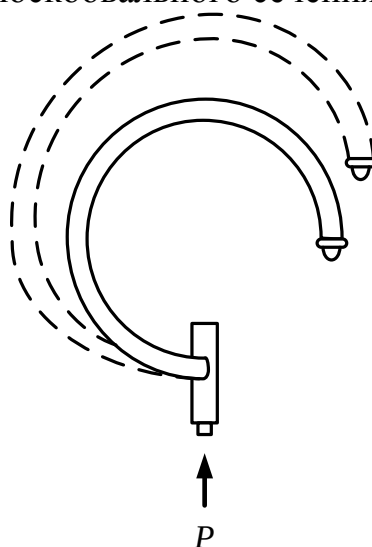


Рис. 20. Трубчатая пружина

Центральная ось пружины представляет собой дугу окружности с углом 200–270°.

Пружины эллиптического и плоскоовального сечения называются трубками Бурдона.

Один конец пружины Бурдона закрепляется неподвижно, а другой – свободный, запаянный, соединяют с механизмом прибора, преобразователем или другим устройством.

Под действием давления, подаваемого во внутреннюю полость трубки, пружины Бурдона деформируются в поперечном сечении. Пружина будет разгибаться, и ее свободный конец совершит линейное перемещение.

Статическая характеристика пружин Бурдона линейна. Диапазон измерения с помощью пружин Бурдона ограничивается пределом их прочности.

Тонкостенные пружины применяются для измерения давления до 6 МПа.

Толстостенные пружины овального сечения применяются для измерения давления до 60 МПа.

4. ИЗМЕРЕНИЕ РАСХОДА

4.1. Расходомеры переменного перепада давления

4.1.1. Расходомеры с сужающими устройствами

Оптимизация процессов теплопередачи от ТВЭЛов и отвода тепла от реактора в значительной мере определяется расходом теплоносителя.

В реакторах канального типа, где расход измеряется в каждом технологическом канале (ТК), расход характеризует степень охлаждения каналов. Недостаточный расход в ТК способствует деформации и расплавлению ТВЭЛов. Поэтому необходимо осуществлять измерение расхода с высокой точностью.

Расходом называют количество вещества, протекающее через сечение трубопровода в единицу времени. Количество вещества можно измерять в единицах массы или в единицах объема. Следовательно, расход можно измерять в единицах массы, деленных на единицу времени (массовый расход) или в единицах объема, деленных на единицу времени (объемный расход).

$$G_v = \frac{V}{t}; \quad G_m = \frac{m}{t}, \quad (33)$$

где G_v – объемный расход;

G_m – массовый расход;

V – объем вещества;

m – масса вещества;

t – время.

Соотношение между массовым и объемным расходами выглядит следующим образом:

$$Q_m = Q_v \rho, \quad (34)$$

где ρ – плотность вещества.

При переходе от объемных единиц к массовым, при измерении расхода жидкостей, необходимо учитывать зависимость плотности от температуры:

$$\rho_t = \frac{\rho_{20}}{1 - \beta(20 - t)}, \quad (35)$$

где ρ_{20} – плотность жидкости при температуре 20°C;

β – температурный коэффициент объемного расширения жидкости;

t – температура жидкости.

Наиболее распространенными единицами объемного расхода являются: л/час, м³/с, м³/ч; а массового расхода: кг/с, кг/ч, т/ч. На АЭС наиболее распространены следующие виды расходомеров:

- переменного перепада давлений;
- тахометрические;
- индукционные (электромагнитные);
- вихревые.

Расходомеры переменного перепада давления основаны на зависимости от расхода перепада давления, создаваемого сужающим устройством, которое установлено в трубопроводе.

В состав расходомера входят преобразователь расхода, создающий перепад давления, дифференциальный манометр, измеряющий этот перепад и соединительные трубки между преобразователем и дифманометром. Если первичный дифманометр (или вторичный измерительный прибор) имеет интегратор, то такой прибор измеряет не только расход, но и количество прошедшего вещества.

Имеется много разновидностей сужающих устройств, таких как диафрагмы, стандартные сопло и трубка Вентури.

Измерение расхода по методу переменного перепада давления основано на законе сохранения энергии. При наличии сужения в трубопроводе скорость жидкости или газа в месте сужения возрастает, что приводит к увеличению кинетической энергии потока.

Это неразрывно связано со снижением потенциальной энергии, т.е. уменьшением давления. На рис. 21 представлен участок трубопровода со встроенным в него сужающим устройством (диафрагмой).

Уравнение Бернулли и уравнение неразрывности струи, составленные для двух сечений трубопровода $A-A$ и $B-B$ (рис. 21), имеют вид:

$$\begin{cases} \frac{p_1'}{\rho_1} + \frac{v_1^2}{2} = \frac{p_2'}{\rho_1} + \frac{v_2^2}{2} \\ \rho_1 v_1 F_1 = \rho_2 v_2 F_2 \end{cases}, \quad (36)$$

где F_1 , v_1 , ρ_1 , ρ_1' – соответственно площадь, средняя скорость, плотность и абсолютное давление потока в сечении $A-A$;

F_2 , v_2 , ρ_2 , ρ_2' – соответственно площадь, средняя скорость, плотность и абсолютное давление потока в сечении $B-B$.

Решаем систему уравнений (36) относительно скорости v_2 , учитывая при этом, что для несжимаемой жидкости плотности до и после сужающего устройства равны:

$$v_2 = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{F_2}{F_1}\right)^2}} \sqrt{\frac{2(p_1' - p_2')}{\rho}}. \quad (37)$$

Обозначив перепад давления через ΔP и умножив скорость v_2 , на F_2 , получим выражение для объемного расхода:

$$G_v = \frac{F_2}{\sqrt{1 - \left(\frac{F_2}{F_1}\right)^2}} \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}}. \quad (38)$$

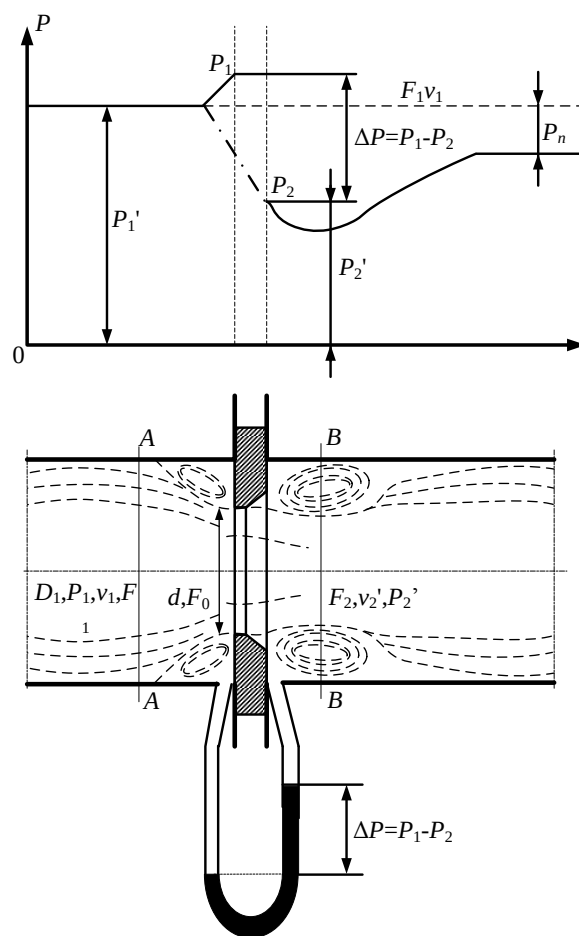


Рис. 21. Участок трубопровода со встроенной диафрагмой

Практически для измерения расхода отбор давления осуществляется у торцов сужающего устройства и в расчет принимают не площадь поперечного сечения потока, а площадь отверстия сужающего устройства F_0 .

Кроме этого, полученная формула расхода (38) не учитывает неравномерность распределения скоростей по сечению и потери на трение. Указанные условия учитываются коэффициентом расхода α :

$$G_v = \alpha F_0 \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}}. \quad (39)$$

4.1.2. Особенности применения сужающих устройств

Применяемые в настоящее время для измерения расхода сужающие устройства (диафрагма, сопло, сопло Вентури) стандартизованы. Разработаны методика их расчета, технические условия монтажа и условия применения. Стандартные сужающие устройства могут быть предварительно рассчитаны и при соблюдении соответствующих правил не нуждаются в поверке по расходу.

Однако стандартизованные сужающие устройства не могут охватить все случаи измерения расхода. В частности, их нельзя применить для измерения малых расходов жидкостей и газов. Ограничения в применении определяются границами постоянства коэффициента расхода α .

Коэффициент расхода α зависит от состояния поверхности трубопровода, остроты кромки диафрагмы и величины модуля, рассчитываемого по формуле:

$$m = \left(\frac{D}{d}\right)^2, \quad (40)$$

где d – диаметр диафрагмы;

D – диаметр трубопровода.

Однако даже при условии учета указанных факторов коэффициент расхода является еще и функцией числа Рейнольдса:

$$Re = \frac{v \cdot D}{\mu}, \quad (41)$$

где v – скорость;

D – внутренний диаметр трубы;

μ – кинематическая вязкость измеряемой среды.

Особенно резко коэффициент расхода изменяется при малых числах Рейнольдса, характеризующих увеличение вязкостных сил по отношению к силам инерции потока. Очевидно, что непостоянство коэффициента расхода при малых числах Рейнольдса вносит существенную погрешность в квадратичную зависимость расход–перепад.

Минимальное число Рейнольдса, отнесенное к диаметру трубопровода, начиная с которого коэффициент расхода стабилизируется и при

дальнейшем возрастании Re остается постоянным, называется предельным числом Рейнольдса и обозначается $Re^{пр}$.

Величина предельного числа Рейнольдса зависит от формы сужающего устройства и значения модуля m . Примерный характер изменения коэффициента расхода в функции числа Re показан на рис. 22.

Значения чисел Re на рис. 22 не указаны, так как они изменяются в зависимости от типа и конструкции сужающего устройства. В заштрихованной зоне, коэффициент расхода непостоянен и стандартные сужающие устройства неприменимы. В связи с этим указанные устройства не могут быть использованы для трубопроводов с диаметром менее 50 мм.

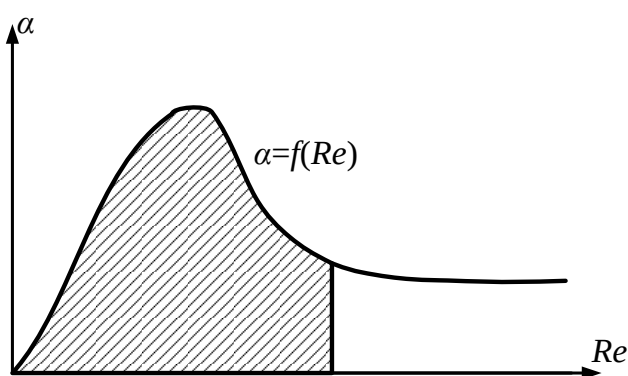


Рис. 22. Характер изменения коэффициента расхода в функции числа Рейнольдса

Для трубопроводов с диаметром более 50 мм применяются следующие измерительные преобразователи:

- *нормальная диафрагма*, представляющая собой тонкий диск, имеющий в центре отверстие с острой прямоугольной кромкой со стороны входа потока;
- *нормальное сопло* — насадка, имеющая со стороны входа плавное округление, а со стороны выхода — развитую цилиндрическую часть. На выходе сопла имеется расточка, предохраняющая выходную кромку от повреждений;
- *нормальное сопло Вентури* отличается от нормального сопла тем, что имеет удлиненную цилиндрическую часть, переходящую непосредственно в диффузор;
- *нормальная труба Вентури*, состоящая из входной части — конфузора, средней части — цилиндрической и выходной части — диффузора. Такие трубы используются на трубопроводах диаметром от 100 до 800 мм. Трубы Вентури требуют в 2 раза меньший прямой участок, чем диафрагмы, и обладают широким диапазоном измерения.

4.1.2. Особенности эксплуатации

Как было показано, между расходом и перепадом давлений в сужающем устройстве существует определенная зависимость. Это позволяет измерять расход с помощью дифманометров и градуировать их в единицах расхода. Такие дифманометры называются дифманометрами-расходомерами. Зависимость между расходом и перепадом давлений квадратичная.

Одним из условий получения достаточной точности измерения расхода является наличие прямолинейных участков до и после сужающего устройства. Исследования дали возможность уточнить минимальные длины прямых участков после некоторых видов местных сопротивлений, и они частично нашли отражение в ГОСТ. Особенно остро вопрос влияния прямолинейных участков стоит при измерении расхода в трубопроводах большого диаметра. Так как увеличение их длины этих участков ведет к удорожанию, что экономически нецелесообразно.

Другим ограничением для применения расходомеров переменного перепада давления является влияние шероховатости трубопровода диаметром менее 300 мм. Шероховатость трубопровода меняется в процессе эксплуатации. Знание характера изменения шероховатости, умение его прогнозировать могло бы позволить вносить поправки в показания расходомеров. Однако эта задача еще в полной мере не решена.

Один из недостатков расходомеров переменного перепада давления – необратимые потери давления на сужающем устройстве. Наиболее энергоемкими являются диафрагмы, в них потери могут достигать 95 % перепада давления на дифманометре, наименее энергоемкими – длинные сопла Вентури.

Другим недостатком является суженый диапазон измерения. Диапазон обычно охватывает интервал 30–100 % в случае использования традиционных дифманометров. Для измерения расхода 0–30 % от максимального применять их не рекомендуется, т.к. не гарантируется точность измерений. При уменьшении расхода до 25 % перепад давления уменьшается в 16 раз, а до 10 % – в 100 раз. При этом относительная погрешность измерения расхода увеличивается во много раз. Расширение диапазона расхода, измеряемого методом переменного перепада давлений, может быть достигнуто путем применения очень чувствительных дифманометров с автоматическим переключением пределов измерения.

Дифманометр подключается к сужающему устройству двумя соединительными линиями (импульсными трубками) с внутренним диа-

метром не менее 8 мм. Длина соединительных линий допускается до 50 м. Однако, из-за возможности возникновения большой динамической погрешности используют длину линии до 15 м.

Перепад давлений должен передаваться к дифманометру без искажения. Давление, создаваемое столбом контролируемой среды в той и другой линиях должно быть одинаковым. В реальных условиях может быть, например, при измерении расхода газа, появление конденсата в неодинаковом количестве, появление пузырьков воздуха в жидкости. Может возникнуть неодинаковый прогрев импульсных линий.

На рис. 23 показана схема соединения дифманометра с сужающим устройством. Соединительные линии к сужающему устройству 1 подключаются через запорные вентили 2. Перед дифманометром устанавливаются продувочные вентили 3.

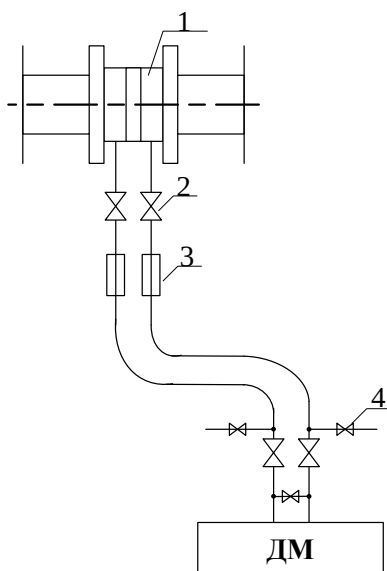


Рис. 23. Схема соединения дифманометра с сужающим устройством

При измерении расхода газа дифманометр устанавливают выше сужающего устройства, чтобы конденсат, образовавшийся в соединительных линиях, мог стекать в трубопровод. Подключаются они к верхней половине сужающего устройства, и их прокладка производится вертикально.

При измерении расхода агрессивных сред в соединительных линиях возможно ближе к сужающему устройству устанавливаются разделительные сосуды 5. Соединительные линии между разделительными сосудами и дифманометрами заполняются разделительной жидкостью.

Соединительные линии между сужающим устройством и разделительным сосудом заполнены контролируемой средой. Также устанавли-

вают газосборник 4 с вентилем для продувки. В качестве разделительной жидкости выбирают неагрессивную жидкость: воду, глицерин, минеральные масла.

4.2. Вихревые расходомеры

Вихревыми называются расходомеры, основанные на зависимости от расхода частоты пульсаций давления, возникающих при обтекании неподвижного тела в трубопроводе.

Срыв вихрей – физическое явление, часто встречающееся в природе. Еще древние греки заметили, что струна натянутая на ветру, иногда начинает мелодично звучать – петь. Даже если в рамке всего одна струна, можно получить целый ряд различных тонов. Нечто подобное, но с гораздо меньшим разнообразием тонов происходит, когда ветер приводит в движение высоковольтные (телеграфные) провода.

При помещении «плохообтекаемого» тела в поток жидкости или газа, с его поверхности поочередно срываются вихри. Этот эффект наблюдается, например, у флага на ветру. Флагшток действует как тело обтекания, а полотнище колеблется с частотой срыва воздушных вихрей с флагштока, чем сильнее ветер, тем частота колебаний выше.

Рассмотрим более подробно поведение статического тела в движущейся среде (жидкости) (рис. 24).

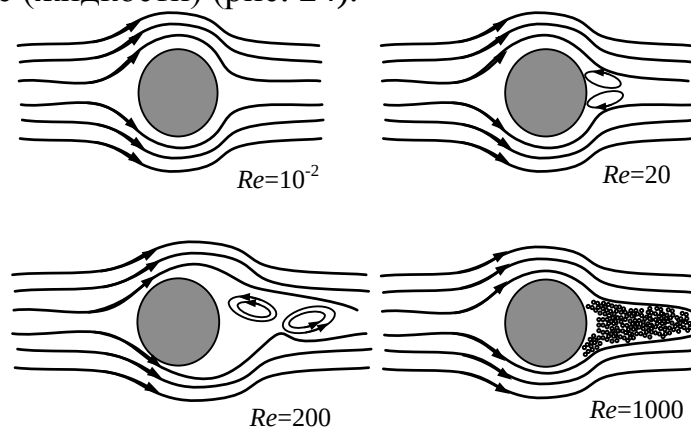


Рис. 24. Линии тока жидкости в зависимости от числа Рейнольдса

В качестве тела представим себе провод, который в сечении мы видим как круг, обтекаемый жидкостью. Линии тока жидкости огибают цилиндр (сечение провода) и плавно продолжают за ним. Такой ток жидкости называется ламинарным. Сила сопротивления в этом случае обязана своим происхождением внутренним трением в жидкости (вязкости) и пропорциональна скорости. Скорость жидкости в любом ме-

сте, так же как и сила сопротивления не зависят от времени, т.е. поток стационарный.

Теперь представим себе, что скорость потока возросла. Опыты показали, что в этом случае, в момент изменения, за цилиндром образуются завихрения потока (вихри). В этом случае, кроме трения начинает влиять изменение количества движения не в микроскопическом масштабе, а в масштабе, сравнимом с размерами тела. Сила сопротивления становится пропорциональной квадрату скорости.

А теперь представим себе, что скорость потока возросла еще сильнее. Опыты показали, что вихри выстраиваются в ровный ряд цепочек. Т.е. вихри «соскакивают» с провода (струны). Именно эти, периодически, соскакивающие вихри с поверхности провода и вызывают его звучание, подобно тому, как звучит струна при щипке ее пальцем.

Явление правильно выстраивания вихрей позади обтекаемого тела, впервые было изучено экспериментально немецким физиком Бернаром, в начале 20 века. Но только, благодаря, последовавшим вскоре, работам Кармана такое течение, казавшееся вначале весьма своеобразным, получило объяснение.

Сегодня система периодических вихрей называется дорожкой Кармана. Принцип действия вихревого расходомера заключается в следующем. Цилиндрическое тело, являющееся первичным преобразователем вихревого расходомера, создает на пути движущегося потока перепад давления между передней и задней стенкой цилиндра, которое приводит к увеличению локальной скорости пограничного слоя обтекающей жидкости (рис. 25).

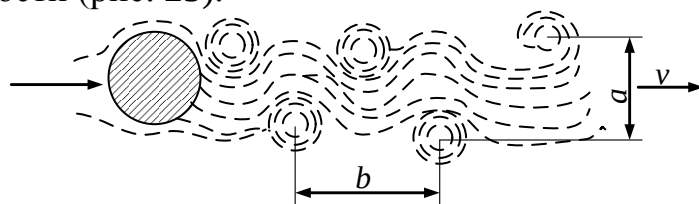


Рис. 25. Схема образования вихрей

В результате этого происходит изменение направления обтекающих струй и образование вихрей за обтекаемым телом. Это происходит как в верхних, так и в нижних точках обтекаемого тела. Но так как развитие вихря с одной стороны препятствует такому же развитию с другой стороны, то образование вихрей происходит поочередно. Образующаяся за цилиндром цепочка вихрей шириной a называется вихревой дорожкой Кармана. Особенностью этой дорожки является постоянное

отношение a/b . Частота образования вихрей пропорциональна скорости потока.

Число преобразователей у вихревых расходомеров, как правило, не превышает двух. В первой ступени в процессе вихреобразования струи создаются пульсации давления и скорости, частота которых пропорциональна объемному расходу.

Во второй ступени эти пульсации преобразуются в выходной сигнал, обычно электрический. Для этого служат преобразователи давления, температуры (термоанемометры), ультразвуковые преобразователи скорости и т.п.

В существующих конструкциях в качестве первичного преобразователя, генерирующего вихри, плохо обтекаемые тела, помещенные внутрь трубопровода. Преимущественное применение в вихревых расходомерах нашли призматические тела прямоугольной, треугольной или трапецеидальной (дельтообразной) форм. У последних основание обращено навстречу потоку. Такие тела образуют сильные и регулярные вихревые колебания, хотя и создают большую потерю давления. Кроме того, они удобны для организации второй ступени преобразования частоты в выходной сигнал.

Для этих тел рекомендуется ширина плоскости тела обтекания, перпендикулярной потоку $d = D/3$ (D – диаметр трубы), а длина тела обтекания (по потоку) $l = d/3$.

Тело обтекания должно иметь острые кромки, располагаться вдоль диаметра трубы и не иметь зазоров между трубой и своей торцевой частью.

У вихревых расходомеров много достоинств:

- отсутствие подвижных частей, простота и надежность преобразователя расхода;
- независимость показаний от давления и температуры среды;
- большой диапазон измерения;
- линейность шкалы и высокая точность;
- частотный измерительный сигнал.

К недостаткам вихревых расходомеров относятся:

- значительная потеря давления, достигающая 30–50 кПа,
- они непригодны при малых скоростях из-за трудности выделения сигнала из шумов, и возникновения нелинейной зависимости между расходом и частотой пульсаций.
- многие конструкции вихревых расходомеров непригодны для измерения загрязненных и агрессивных веществ, которые могут нару-

шить работу преобразователей выходного сигнала, но на процессе вихреобразования загрязнение и коррозия тела обтекания практически сказываются очень мало (в отличие, например, от сужающих устройств). Поэтому при выборе бесконтактного преобразователя выходного сигнала (например, ультразвукового) вихревые расходомеры могут служить и для измерения загрязненных, агрессивных и абразивных веществ.

4.3. Электромагнитные расходомеры

4.3.1. Электромагнитные расходомеры с постоянным магнитным полем

Одно из ведущих мест среди технологий измерения расхода занимают электромагнитные расходомеры (ЭМР). Преимущества ЭМР обеспечили им широкое распространение в мировой практике измерения расхода разнообразных жидкостей.

Первые серийные ЭМР, произведенные голландской Tobinmeter Company, появились на рынке в 1952 году, а двумя годами позже американская компания Foxboro выпустила свой ЭМР и, теперь, более полувека спустя, продолжает выпускать расходомеры электромагнитного типа.

В основу работы электромагнитного расходомера положен закон электромагнитной индукции Майкла Фарадея, согласно которому ЭДС электромагнитной индукции в контуре численно равна и противоположна по знаку скорости изменения магнитного потока Φ сквозь поверхность, ограниченную этим контуром:

$$E = -\frac{d\Phi}{dt}. \quad (42)$$

Знак минус в формуле (42) выражением правила Ленца: индуктивный ток в контуре имеет всегда такое направление, что создаваемый им магнитный поток сквозь поверхность, ограниченную контуром, уменьшает те изменения магнитного потока, которые вызвали появление индукционного тока. При этом ЭДС возникает независимо от причины изменения магнитного потока – как от изменения самого поля, так и от движения проводника. Поэтому при движении проводящей жидкости в магнитном поле на ней наводится ЭДС пропорциональная скорости изменения магнитного потока, а значит скорости движения жидкости:

$$\bar{E} = [\bar{B} \cdot \bar{V}]. \quad (43)$$

В алгебраической форме уравнение (43) приобретает вид:

$$E = B \cdot V \cdot D, \quad (44)$$

где D – диаметр трубопровода (расстояние между электродами).
Скорость измеряемой среды определяется зависимостью:

$$V = \frac{4 \cdot G_v}{\pi \cdot D^2}. \quad (45)$$

Подставляя (45) в (44) получим зависимость измерительного сигнала E от расхода:

$$E = \frac{4 \cdot B \cdot G_v}{\pi \cdot D} = k_e \cdot B \cdot G_v. \quad (46)$$

где k_e – коэффициент пропорциональности, который определяют в процессе калибрования.

Из формулы (46) следует, что при $B = \text{const}$ измеряемая величина ЭДС линейно зависит от объемного расхода жидкости. Электромагнитные расходы могут быть использованы для измерения расхода жидкости, обладающей электропроводимостью не менее 10^{-5} См/м, а также жидких металлов.

Из выражения (46) видно, что погрешность электромагнитного преобразователя будет определяться величиной k_e и точностью измерением разности потенциалов E .

Конструктивно обычно ЭМР состоят (рис. 26) из:

- измерительного участка, выполненного из диамагнитного материала 1 с внутренним изоляционным покрытием и футеровкой 2;
- магнитной системы ($N-S$, расположенной вне трубопровода);
- электродов 3, размещенных по периметру трубопровода, на его диаметре, перпендикулярно направлению движения жидкости и силовым линиям магнитного поля.

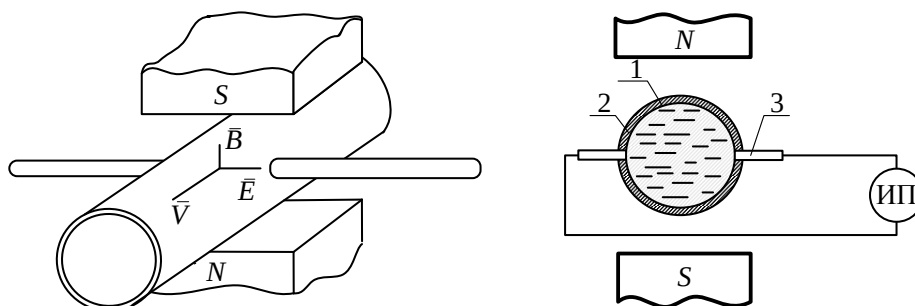


Рис. 26. Конструкция ЭМР с постоянным магнитным полем

Электроды с помощью соединительных проводников подключены к измерительному прибору ИП (милливольтметру), шкала которого отградуирована в единицах расхода. Если использовать в качестве проводника поток электропроводящей жидкости, текущей между полюса-

ми магнита и измерить наведенную в жидкости ЭДС, то можно определить скорость потока или объемный расход жидкости.

На показания электромагнитного расходомера также влияет деформация поля скоростей потока жидкости, происходящая под действием местных гидравлических сопротивлений близко расположенных от расходомера. Однако их влияние на показания электромагнитных расходомеров значительно ниже, чем у расходомеров других типов.

Постоянное магнитное поле имеет следующие достоинства:

- относительную простоту устройства магнитной системы;
- возможность измерения расходов, изменяющихся с высокой частотой.

Но такому полю свойствен существенный недостаток – поляризация электродов. При протекании электрического тока через электролит нарушается электродинамическое равновесие на границе электрод–жидкость из-за ограниченной скорости электрохимических реакций.

Чем больше сила тока, тем большее число ионов не успевает разрядиться при проходе через поверхностный слой. В результате происходит концентрация отрицательных ионов у положительного электрода, а положительных у отрицательного, которые образуют ЭДС поляризации $E_{\text{п}}$, направленную навстречу измеряемой ЭДС.

Неполная идентичность электродов, неоднородность жидкости и неодинаковость местных скоростей приводит к тому, что потенциалы, возникающие у двух электродов, не могут скомпенсировать друг друга и образуется гальваническая ЭДС, нарушающая нормальную работу расходомера.

В связи с этим для измерения расхода обычных жидкостей с ионной проводимостью применяют почти всегда переменное магнитное поле.

Постоянное магнитное поле применяют обычно для измерения расхода расплавленных металлов, имеющих электронную, а не ионную проводимость. Наибольшее применение электромагнитные расходомеры с постоянным магнитом нашли на АЭС для измерения расхода жидкометаллического теплоносителя в активной зоне реактора БН-350 и БН-600.

Однако для повышения точности измерения расхода необходимо иметь магнитную систему достаточно протяженную вдоль трубопровода. Так как лишь при длине системы более пяти диаметров трубопровода характеристика преобразователя становится линейной. Это ведет к утяжелению конструкции преобразователя, особенно при больших диаметрах трубопровода.

Высокие температуры, при которых работают постоянные магниты в электромагнитных расходомерах на АЭС, приводят с течением времени к изменению их характеристик. Данное обстоятельство приводит к необходимости проведения на АЭС периодической поверки и переградуировки данных расходомеров.

4.3.2. Электромагнитные расходомеры с переменным магнитным полем

Для предотвращения поляризации электродов применяют переменные магнитные поля. Индукция такого поля определяется формулой:

$$B = B_m \cdot \sin 2\pi ft. \quad (47)$$

Учитывая выражение (46) зависимость (46) приобретает вид:

$$E = \frac{4G_v B_m}{\pi D} \sin 2\pi ft. \quad (48)$$

Напряжение E , индуцированное в этой среде, прямо пропорционально среднему расходу потока.

Электромагнитный расходомер с переменным магнитным полем состоит из первичного преобразователя, который устанавливается на трубопроводе, и преобразователя сигнала.

Первичный преобразователь ЭМР имеет индуктор, состоящий из двух пар катушек с осями перпендикулярными оси трубопровода. Этот индуктор создает поперечное магнитное поле. Магнитная индукция B и расстояние между электродами D (номинальный диаметр трубы) постоянны. Индуцированный сигнал напряжения снимается двумя измерительными электродами, находящимися в прямом контакте со средой. Чтобы напряжение не замыкалось накоротко по стенке трубы, измерительная труба изготавливается из электроизоляционного материала или футеруется им изнутри.

В ЭМР с переменным магнитным полем явление поляризации электродов отсутствует, однако проявляются другие недостатки при измерении:

- трансформаторный эффект, когда в витке, который образует жидкость в трубопроводе, между соединительными проводами и вторичными приборами наводится трансформаторная ЭДС, источник возникновения которой – первичная обмотка возбуждения магнитного поля;
- емкостный эффект, возникает из-за большой разности потенциалов между системами возбуждения магнитного поля, электродами и паразитной емкостью между ними;

- эффект изменения частоты колебаний тока системы возбуждения магнитного поля.

Для компенсации этих побочных эффектов и выделения полезного сигнала совершенствуют измерительные схемы.

4.3.3. Особенности применения электромагнитного метода измерения расхода

ЭМР состоит из первичных и вторичных устройств: сенсорного преобразователя расхода и электронного преобразователя расхода модели. Они размещаются в корпусе расходомера.

Как показано на рис. 27, стандартная конфигурация корпуса имеет три изолированных отделения: по одному для каждого электрода и одно для катушек. Электроды отделены от остальных компонентов и катушек.

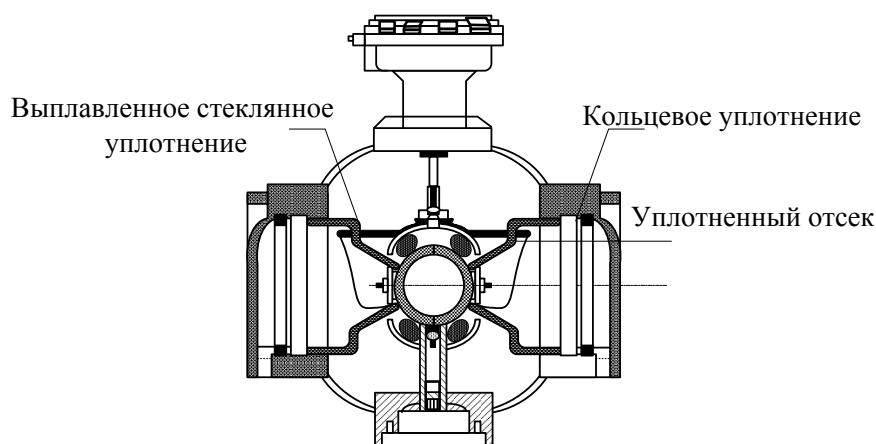


Рис. 27. Внутренне представление корпуса индукционного расходомера

Если при повреждении покрытия рабочая жидкость проникает через прокладку электрода, она задерживается в отделении электродов. Герметизация отделения электродов предотвращает процесс проникновения рабочей жидкости в отделение катушек и повреждение самих катушек или других внутренних элементов.

Конструкция электродного отделения позволяет удерживать технологическую жидкость при полном давлении в трубопроводе. Крышки с кольцевыми уплотнителями обеспечивают доступ извне в каждое электродное отделение со стороны датчика. В каждой крышке предусмотрены дренажные отверстия для удаления жидкости. Так как в электродном отделении поддерживается такое же давление, как и в трубопроводе, то перед снятием крышки это давление необходимо сбросить.

Первичные преобразователи электромагнитных расходомеров не имеют частей, которые выступают внутрь трубопровода, сужений или

изменений профиля. Благодаря этому гидравлические потери на приборе минимальны. Кроме того, преобразователь расходомера и технологический трубопровод можно чистить и стерилизовать без демонтажа. Поэтому такие расходомеры используют в биохимической и пищевой промышленности, где доминирующими являются требования к стерильности измерений среды.

Труба преобразователя обычно изготавливается из коррозионностойкой стали. В особых случаях, при небольших давлениях и малых диаметрах, трубу преобразователя делают из стекла или пластмассы. Очень хорошим материалом для изготовления трубы, в том числе и большого диаметра, является многослойный стеклопластик. Он выдерживает большое давление и обладает изоляционными свойствами.

Измерительные каналы большинства современных ЭМР имеют в основном фторопластовую футеровку, которая является важным элементом конструкции первичных преобразователей. Материал футеровки определяет как технические (стабильность температур и давлений измеряемой среды на измерительном участке), так и эксплуатационные характеристики (надежность, долговечность).

В качестве изоляционного покрытия внутренней поверхности стальной трубы и фланцев преобразователя применяют полиуретан, резину, эмаль, фторопласт и другие материалы в зависимости от свойств измеряемой жидкости.

Так, резина хорошо сопротивляется абразивному износу, поэтому ее рекомендуют для измерения расхода рудных пульп. Температурный предел ее применения 70 °С. Но в щелочных средах резина разрушается.

Кислотостойкая эмаль пригодна для всех кислот, кроме плавиковой. Ее успешно применяют в частности при измерении расхода суспензии латекса и поливинилхлорида в диметилформальдегиде в процессе изготовления синтетических волокон. Коэффициенты расширения эмали и материала трубы (коррозионно-стойкой стали) должны быть близки друг к другу. Предел применения эмали 180 °С. Для щелочных сред эмаль не подходит.

Фторопласт помимо универсальной коррозионной стойкости хорошо сопротивляется также и изнашиванию. Так, фторопласт-4 пригоден для всех агрессивных сред, кроме плавиковой кислоты, 98 % азотной кислоты, царской водки, ацетона и серного эфира, а фторопласт-40 подходит для всех жидкостей, кроме содержащих трехфтористый хлор и элементарный фтор. Футеровка фторопластом производится сваркой внутри преобразователя набора втулок и узла электрода, а соединение с

металлом осуществляется с помощью ласточкина хвоста. Температурный предел фторопласта около 150 °С. Но для высоких давлений фторопласт плохо пригоден из-за текучести, возрастающей с повышением температуры.

Электродная система – важный узел ЭМР, чувствительная система, которая измеряет величину ЭДС на электродах, связанную зависимостью со средней скоростью потока. Electroды изготавливают из антикоррозийного и достаточно твердого материала, чаще всего из коррозионностойкой стали, но иногда из титана или платино-иридиевого сплава. Необходимо обеспечить помимо хорошего контакта электрода с текущей жидкостью его изоляцию от металлической стенки трубы и плотность всего соединения. Правильное измерение ЭДС нарушается, если поверхность электрода загрязняется. Или на ней образуются осадки. Применяют различные методы очистки, но более эффективен ультразвуковой метод очистки. К стержню электрода присоединяется пьезоэлемент, на который подается напряжение с частотой 45–65 кГц. При возникающих механических колебаниях электрода осадки отделяются от него и уносятся жидкостью.

Типичный динамический диапазон измерения расхода ЭМР в несколько раз превышает динамические диапазоны ультразвуковых, вихревых и тахометрических расходомеров.

При этом для осесимметричных потоков показания ЭМР не зависят от характера движения, которое позволяет измерять очень низкие скорости, соответствующие ламинарному режиму.

Диапазон измеряемых скоростей потока ЭМР составляет от единиц миллиметров в секунду до 10–15 метров в секунду.

Электромагнитные расходомеры обладают рядом преимуществ:

- на показания расходомеров не влияют взвешенные в жидкости частицы и пузырьки газа, а также параметры измеряемого потока жидкости (давление, температура, вязкость, плотность и тп.), если они не изменяют ее электропроводности.
- электромагнитные расходомеры позволяют проводить измерения без потери давления, а также проводить измерения в стерильных объектах.
- электромагнитные расходомеры практически безынерционны, поэтому могут быть использованы при измерении быстро меняющихся потоков.

ЭМР давно стали основой поверочных установок, обеспечивая в сравнительно узком диапазоне расхода и эталонных условиях предельную точность в пределах относительной погрешности $\pm 0,15\%$.

ЭМР непригодны для измерения расхода газов, а также жидкостей с малой электропроводностью, например легких нефтепродуктов, спиртов и т.п.

4.4. Тахометрические расходомеры

Тахометрическими называются расходомеры и счетчики, имеющие подвижный, обычно вращающийся элемент, скорость движения которого пропорциональна объемному расходу. Они подразделяются на турбинные и шариковые.

Для создания тахометрического расходомера надо скорость движения сенсорного элемента предварительно преобразовать в сигнал пропорциональный расходу и удобный для измерения. В этом случае необходим двухступенчатый преобразователь расхода. Его первая ступень – турбинка или шарик или другой элемент, скорость движения которого пропорциональна объемному расходу, а вторая ступень – тахометрический преобразователь, вырабатывающий измерительный сигнал, обычно частоту электрических импульсов, пропорциональную скорости движения тела. Здесь измерительным прибором будет электрический частотомер: цифровой или аналоговый. Если его дополнить счетчиком электрических импульсов, то получим наряду с измерением расхода также и измерение количества прошедшего вещества.

В зависимости от типа вращающегося тела тахометрические расходомеры подразделяются на турбинные и шариковые.

4.4.1. Турбинные расходомеры

Турбинные расходомеры бывают с аксиальным или тангенциальным воздействием потока на турбинку (рис. 28) и используются как для измерения объемного расхода, так и в качестве счетчика количества жидкости и газа. Число оборотов турбинки пропорционально средней скорости потока жидкости и обратно пропорционально шагу лопастей:

$$n = k \cdot \frac{G_v}{l \cdot S}, \quad (49)$$

где k – постоянная прибора;

l – шаг лопастей вертушки;

S – площадь поперечного сечения потока;

G_v – объемный расход.

Для успокоения потока перед вертушкой со стороны входа жидкости устанавливается струевыпрямитель, состоящий из нескольких радиально закрепленных прямых пластин.

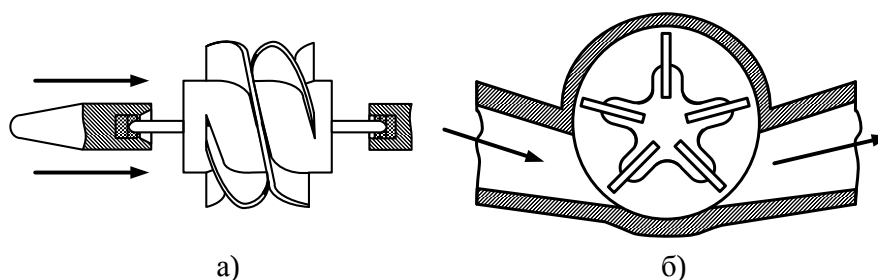


Рис. 28. Различные типы турбинок:
а) аксиальные; б) тангенциальные

Для турбинных расходомеров характерно влияние на их характеристику местных сопротивлений, расположенных перед датчиком. Так погрешность измерения расхода турбинными расходомерами при наличии на входе у них гидравлических сопротивлений, закручивающих поток, может возрасти на 20 % и более. Поэтому при установке прибора необходимо предусматривать перед ним прямой участок трубопровода длиной $(8-10)D$, а после него – длиной не менее $5D$ (D – внутренний диаметр трубопровода).

Для измерения количества жидкости при малых расходах используются скоростные счетчики с тангенциальными турбинками. В этих счетчиках турбинка с прямолинейными или криволинейными лопастями установлена на вертикальной оси. Поток жидкости тангенциально подводится к турбинке и приводит ее во вращение.

Принципиально турбинный расходомер может работать в любом положении: в горизонтальном, вертикальном или наклонном. Однако моменты трения в подшипниковых узлах могут изменяться из-за изменения нагрузки на них при различной ориентации расходомера, что может сказаться на результатах измерения.

Постоянная времени датчика прямо пропорциональна моменту инерции турбинки, плотности ее материала, осевой длине, площади проходного сечения и обратно пропорциональна расходу, плотности жидкости и моменту инерции жидкости, заполняющей пространство между лопастями.

Основной недостаток турбинных расходомеров – недостаточность их ресурса. Основные причины выхода из строя – отличие условий эксплуатации от предполагаемых при проектировании. Наличие возмущений в потоке, вызывающих вибрацию турбинки.

4.4.2. Шариковые расходомеры

В России получили распространение шариковые расходомеры (ШР) типа Сатурн: с тангенциальным и аксиальным подводом потока. С

тангенциальным подводом потока для измерения расходов жидкостей с температурой до 100 °С в диапазоне 0,1–10 м³/с. С аксиальным закручивающим аппаратом для измерения расходов от 3 до 360 м³/с.

Принцип действия шарикового расходомера базируется на передаче скорости движения жидкости свободно плавающему телу (при этом в измерительной среде отсутствуют опоры). В ШР в качестве свободно плавающего тела используется шарик. Это объясняется тем, что для обеспечения постоянного силового воздействия со стороны потока на тело, а значит и равномерного его вращения при неизменной скорости измеряемого потока необходимо, чтобы площадь проекции этого тела на плоскость, перпендикулярную вектору скорости потока, была постоянной. Именно такое условие выполняется для тела в форме шарика. При плотности материала шарика, близкой к плотности измеряемой жидкости, можно считать, что шарик движется со скоростью жидкости.

Угловая скорость вращения шарика прямо пропорциональна скорости протекания жидкости через прибор, и, следовательно, пропорциональна измеряемому расходу.

Рассмотрим более подробно принцип работы шариковых расходомеров с осевым подводом потока, поскольку именно они получили распространение в атомной промышленности.

В случае осевого подвода потока угловая составляющая скорости потока создается лопастями неподвижного струенаправляющего аппарата. Подвод и отвод потока осуществляется по оси рабочей камеры.

Шариковый тахометрический расходомер с осевым подводом потока представлен на рис. 29. На пути потока жидкости размещается струенаправляющий аппарат 1, с помощью которого жидкость двигается по винтовой линии вокруг оси трубопровода. Далее находится свободно плавающее тело – шарик 3, движению которого далее в осевом направлении препятствует ограничительное кольцо 4. Шарик под действием силы гидродинамического давления будет вращаться в плоскости, перпендикулярной оси трубопровода. На корпусе прибора 5 в зоне вращения шарика находится устройство для съема сигнала 2. Поток измеряемой жидкости после попадания в корпус прибора начинает двигаться по винтовой линии. В результате взаимодействия жидкости и шарика последний начинает двигаться со скоростью, пропорциональной расходу жидкости. Частота вращения шарика, который изготовлен с ферромагнитной вставкой, фиксируется вторичным преобразователем – устройством для съема сигнала.

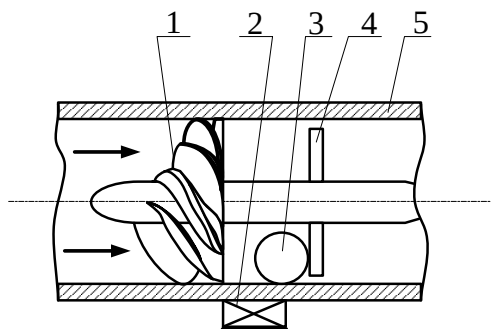


Рис. 29. Шариковый расходомер с осевым подводом поток:

1 – струенаправляющий аппарат; 2 – устройство для съема сигнала. 3 – шарик;
4 – ограничительное кольцо; 5 – корпус

Для работы при высоких температурах теплоносителя в технологических каналах первого контура АЭС РБМК разработан шариковый аксиальный расходомер ШТОРМ-32 М. Для измерения в каналах системы управления и защиты – ШТОРМ-8А.

Таким образом, тахометрические шариковые расходомеры ШТОРМ наряду с расходомерами переменного перепада давления, нашли в России наибольшее применение на АЭС.

5. ИЗМЕРЕНИЕ УРОВНЯ

Многообразие методов измерения уровня, объясняется многообразием задач по определению уровня: различные продукты, условия, точность, надежность, стоимость. Уровнемеры разделяют по продукту (веществу), уровень которого измеряется: датчики уровня жидких и сыпучих продуктов.

К основным сложностям работы приборов с жидкими продуктами относятся:

- часто работа ведется с агрессивными и ядовитыми средами;
- возможна коррозия частей контактирующих с продуктом;
- возможно налипание продукта на контактные части сенсорного элемента;
- широкий разброс плотности продукта (даже в одном и том же технологическом процессе);
- часто присутствуют бурлящие и пенящиеся поверхности;
- иногда требуется определять уровни для нескольких продуктов, или уровень раздела двух жидкостей.

Основные особенности измерения уровня сыпучих веществ:

- большие размеры бункеров, силосов;
- сложная форма поверхности (горка, воронка, слипшимися комками).

По принципу действия уровнемеры для жидкостей и сыпучих веществ разделяются на:

- механические (поплавковые, буйковые) – для измерения уровня используется поплавок, находящийся на поверхности жидкости или массивное тело (буй), частично погружаемое в жидкость;
- гидростатические, основанные на измерении гидростатического давления столба жидкости;
- электрические – величины электрических параметров зависят от уровня жидкости;
- акустические (ультразвуковые) – основаны на принципе отражения от поверхности звуковых волн;
- микроволновые (радарные, волноводные), основанные на принципе отражения поверхности сигнала высокой частоты (СВЧ);
- радиоизотопные, основанные на использовании интенсивности потока ядерных излучений, зависящих от уровня жидкости.

5.1. Механические уровнемеры

5.1.1. Поплавковые уровнемеры

Поплавковые датчики уровня являются самым простым и недорогим решением для детектирования предельного уровня жидкостей. Для правильного выбора поплавкового сигнализатора уровня следует учитывать особенности измеряемой жидкости и параметры окружающей среды, ведь температурный режим, пена, завихрения (от работающего миксера) и т.д. могут стать проблемой для одних поплавковых датчиков и не оказывать влияние на другой тип поплавковых датчиков уровня.

Уровнемер поплавковый предназначен для выдачи электрического дискретного сигнала об уровне жидкости и уровне раздела двух несмешивающихся жидкостей в аппаратах и резервуарах технологических установок. В поплавковых уровнемерах имеется плавающий на поверхности жидкости поплавок, в результате чего измеряемый уровень преобразуется в перемещение поплавка. В таких приборах используется легкий поплавок, изготовленный из коррозионностойкого материала.

Для передачи информации от чувствительного элемента (поплавок) используются различные виды связи. Как правило, поплавок снабжен магнитом и заключен в измерительную трубу, либо скользит по направляющему стержню. Изменение сопротивления преобразуется в электрический выходной сигнал, что дает помимо визуального контроля возможность дистанционной передачи показаний и включения в систему автоматизации.

В зависимости от вида контролируемой жидкости возможны различные исполнения зондов:

- пластиковые для агрессивных кислот и щелочей;
- из нержавеющей стали для воды, масел и т.п.;
- из нержавеющей стали во взрывозащищенном исполнении для горючих жидкостей, таких как топливо, растворители, спирты.

Преимущества использования поплавковых уровнемеров:

- простота;
- прочность;
- невысокая стоимость;
- показания уровня почти не зависят от изменений плотности жидкости;
- не требуется периодическая калибровка;

- только один подвижный элемент – поплавков.

Недостатки поплавковых уровнемеров:

- непригодны для клейких жидкостей;
- проблемы с плещущимися жидкостями.

5.1.2. Буйковые уровнемеры

Уровнемеры буйковые предназначены для работы в системах автоматического контроля, управления и регулирования параметров производственных технологических процессов с целью выдачи информации в виде стандартного пневматического сигнала об уровне жидкости или границы раздела двух несмешивающихся жидкостей, находящихся под вакуумметрическим, атмосферным или избыточным давлением. В буйковых уровнемерах применяется неподвижный погруженный в жидкость буюк. Масса буйка выбирается так, чтобы он не всплывал при полном его погружении в жидкость

Буйковые уровнемеры часто применяются для измерения уровня раздела фаз двух жидкостей, незаменимы при работе с высокими давлениями и температурами продукта. Возможно, также, их использование для определения плотности рабочей среды при неизменном уровне.

Принцип действия буйковых уровнемеров основан на том, что на погруженный буюк действует со стороны жидкости выталкивающая сила. По закону Архимеда эта сила равна весу жидкости, вытесненной буйком. Количество вытесненной жидкости зависит от глубины погружения буйка, то есть от уровня в емкости. Таким образом, в буйковых уровнемерах измеряемый уровень преобразуется в пропорциональную ему выталкивающую силу. Действие этой силы воспринимает тензопреобразователь, либо индуктивный преобразователь, либо заслонка, перекрывающая сопло (пневматические уровнемеры). Зависимость выталкивающей силы от измеряемого уровня линейная.

5.2. Гидростатические уровнемеры

Гидростатический метод измерения уровня основан на измерении гидростатического давления столба жидкости по формуле:

$$P = \rho \cdot g \cdot h, \quad (50)$$

где P – давление столба жидкости;

ρ – плотность среды;

g – ускорение свободного падения;

h – высота столба жидкости.

Гидростатические датчики уровня применяются для измерения уровня любых жидкостей, начиная от воды и заканчивая пастами, в резервуарах, скважинах, колодцах. Гидростатические уровнемеры дешевы и просты по конструкции, но имеют ограниченное применение из-за условий применения (монтаж на днище резервуара, требуется постоянная плотность измеряемого объекта, только для спокойных объектов/процессов).

Гидростатические уровнемеры погружного типа, у которых непосредственно измерительная ячейка давления опускается сверху на штыре или специальном кабеле, применяются в каналах, заглубленных резервуарах, скважинах, колодцах и т.п.

Датчики врезного типа предназначены для монтажа в нижней части емкости. Такой способ монтажа возможен только для емкостей расположенных на поверхности, то есть когда есть доступ к нижней части резервуара.

Иногда при измерении уровня гидростатическим методом применяются выносные разделительные мембраны. Они используются в следующих случаях:

- температура технологического процесса выходит за рамки стандартного рабочего диапазона датчика давления и не может быть скомпенсирована с помощью импульсных линий;
- рабочая среда является агрессивной и может потребоваться частая замена датчика давления или использование специальных материалов мембраны;
- рабочая среда содержит взвешенные частицы или обладает повышенной вязкостью в результате чего может произойти закупорка импульсной линии;
- имеется необходимость в удобной очистке соединений от рабочей среды во избежание накопления отложений;
- рабочая среда может замерзать или затвердевать внутри датчика или импульсной линии.

Достоинства гидростатических уровнемеров следующие:

- применим для загрязнённых жидкостей;
- реализация метода не предполагает использования подвижных механизмов;
- соответствующее оборудование не нуждается в сложном техническом обслуживании.

Недостатки данного метода измерения уровня:

- движение жидкости вызывает изменение давления и приводит к ошибкам измерения (давление относительно плоскости отсчёта зависит от скорости потока жидкости вследствие закона Бернулли);
- атмосферное давление должно быть скомпенсировано;
- зависимость показаний от плотности жидкости, поэтому изменение плотности может быть причиной ошибки измерения.

Гидростатические уровнемеры – датчики избыточного давления, поэтому необходима связь сенсора с атмосферой. У датчиков избыточного давления измеряемая среда и атмосферное давление в баке действуют с одной стороны чувствительного элемента, и только атмосферное давление – с другой. Для открытых ёмкостей атмосферное давление в баке компенсируется атмосферным давлением вне его, и датчик измеряет только давление среды.

Для полностью закрытых емкостей, где создаётся избыточное давление между крышкой емкости и жидкостью, наиболее оптимальным будет применение гидростатических датчиков дифференциального давления. В этом случае, с помощью специального капилляра необходимо связывать датчик дифференциального давления с областью избыточного давления емкости.

5.3. Ультразвуковые уровнемеры

Ультразвуковые уровнемеры имеют много преимуществ перед другими видами – они обладают хорошей точностью измерения, не изнашиваются при использовании и имеют низкую стоимость. Именно эти качества значительно повысили популярность ультразвуковых уровнемеров, которые используют в тех системах, где поплавковые и буйковые уровнемеры применять невозможно.

В акустических, или ультразвуковых, уровнемерах используется явление отражения ультразвуковых колебаний от плоскости раздела сред жидкость–газ.

Действие уровнемеров этого типа основано на измерении времени прохождения импульса ультразвука от излучателя до поверхности жидкости и обратно. При приеме отраженного импульса излучатель становится датчиком. Как правило, наиболее распространен вариант установки ультразвукового датчика в верхней части емкости. При этом сигнал проходит через воздушную среду, отражаясь от границы с твердой (жидкой) средой. Уровнемер в этом случае называется акустическим. Существует, также, вариант установки датчика в дно емкости.

Сигнал в этом случае отражается от границы с менее плотной средой. Такой датчик называется – ультразвуковым уровнемером. В первом случае измеряемое время будет тем больше, чем ниже уровень жидкости, во втором – наоборот. Электронный блок служит для формирования излучаемых ультразвуковых импульсов, усиления отраженных импульсов, измерения времени прохождения импульсом двойного пути (в воздухе или жидкости) и преобразования этого времени в унифицированный электрический сигнал.

Уровнемер акустический предназначен для бесконтактного автоматического дистанционного измерения уровня жидких сред, в том числе взрывоопасных, агрессивных, вязких, неоднородных, выпадающих в осадок, а также сыпучих материалов с диаметром гранул и кусков от 5 до 300 мм, при температуре контролируемой среды от минус 30 °С до плюс 250 °С и давлении – до 4 МПа, сред с самыми различными физическими свойствами, за исключением сильнопарящих, сильнопенящихся жидкостей и мелкодисперсных и пористых гранулированных сыпучих продуктов. Диапазон работы ультразвуковых уровнемеров – до 25 м.

Основные достоинства ультразвуковых уровнемеров:

- бесконтактный;
- применим для загрязнённых жидкостей;
- реализация метода не предъявляет высоких требований к износостойкости и прочности оборудования;
- независимость от плотности контролируемой среды.

Недостатки:

- отражения от нестационарных препятствий (например, мешалок) могут вызвать ошибки измерения;
- звуковой сигнал не может распространяться в вакууме;
- на показания оказывают влияние турбулентность, пена, пар, газовые смеси.

5.4. Микроволновые радарные уровнемеры

Радарные уровнемеры – наиболее универсальные средства измерения уровня и подобно акустическим уровнемерам, используют явление отражения электромагнитных колебаний от плоскости раздела сред жидкость–газ.

Радарные датчики уровня не имеют контакта с измеряемым объектом. Это позволяет использовать их в сложных условиях, в частности, при высоком давлении, высоких температурах, при нахождении паров и

газов над поверхностью. Также они могут применяться для измерения уровня агрессивных, вязких, неоднородных жидких и сыпучих материалов.

От ультразвуковых бесконтактных уровнемеров их выгодно отличает гораздо меньшая чувствительность к температуре и давлению в рабочей емкости, к их изменениям, а также большая устойчивость к таким явлениям как запыленность, испарения с контролируемой поверхности, пенообразование. Радарные уровнемеры обеспечивают высокую точность (до ± 1 мм.), что позволяет использовать их в системах коммерческого учета. Современные радарные уровнемеры являются «интеллектуальными» устройствами, объединяющими в себе и измерительную часть, и обработку полученного сигнала. Часто представляют собой интерфейсные устройства. Вместе с тем существенным лимитирующим фактором применения радарных уровнемеров остается высокая стоимость данных приборов.

Датчик уровня построен по принципу радиолокатора. Это один из классических методов радарного (радиолокационного) измерения расстояния позволяющий минимизировать влияние паразитных помех и помех, связанных с неровностями (волнениями) поверхности измеряемого объекта.

Преимущества данного метода измерения:

- радиоволны могут распространяться и в вакууме, на них не влияет температура, давление, влажность, пена, туман, пыль, вид материала (жидкий/сыпучий), плотность, значение диэлектрической постоянной, химически агрессивная среда;
- надёжное измерение порошкообразных материалов даже в процессе наполнения ёмкости;
- измерение уровня жидкостей при образовании пены в условиях повышения давления;

Недостатки:

- электромагнитные волны поглощаются (не отражаются) диэлектриками (пластмасса, стекло, бумага и т.д.);
- диэлектрическая постоянная измеряемого вещества должна быть больше 1,6.

В настоящее время широко используются два типа микроволновых уровнемеров: импульсные и частотно модулированные FMCW (Frequency Modulated Continuous Wave).

Микроволновый генератор датчика уровня FMCW формирует радиосигнал, частота которого изменяется во времени по линейному закону. Этот сигнал излучается в направлении измеряемого объекта (по-

верхность среды), отражается от него и часть сигнала, через определенное время, зависящее от скорости света и расстояния до поверхности продукта, возвращается обратно в антенну. Излученный и отраженный сигнал смешиваются в датчике уровня, и в результате образуется сигнал, частота которого равна разности частот принятого и излученного сигнала, соответственно пропорциональна времени распространения, и соответственно расстоянию от антенны до измеряемого объекта.

Дальнейшая обработка сигнала осуществляется микропроцессорной системой датчика уровня и заключается в точном определении частоты результирующего сигнала и пересчете ее значения в значение уровня наполнения резервуара. Обработка сигнала в датчиках уровня, как правило, построена с применением процессоров цифровой обработки сигналов и благодаря этому, она производится в реальном масштабе времени без длительного накопления информации.

Отраженный, а значит и результирующий сигнал, несущий в себе информацию об уровне измеряемого объекта, содержит также и различные шумовые и паразитные составляющие, это связано с тем, что измерение производится в реальных условиях возможных волнений поверхности измеряемого продукта, неполных отражений радиосигнала и его частичного поглощения поверхностью измеряемого продукта, загрязнением антенны уровнемера. Поэтому результирующий сигнал подвергается спектральному анализу, обеспечивающий высокоэффективное подавление ложных отражений и помех. Таким образом, с высокой точностью определяется частота результирующего сигнала, соответствующая уровню измеряемого объекта.

Импульсные микроволновые уровнемеры излучают короткий сигнал в импульсном режиме, при этом прием отраженного сигнала происходит в промежутках между импульсами исходного излучения. Сигнал от радара излучается антенной и отраженный от цели (в нашем случае поверхность среды) приходит назад через время задержки t . Прибор вычисляет время прохождения прямого и обратного сигналов и определяет значение расстояния до контролируемой поверхности по выражению:

$$L = \frac{c \cdot t}{2}, \quad (51)$$

где c – скорость света.

Частота излучения – важнейший параметр радарного уровнемера, определяющий его потенциальные возможности. Чем более высока частота, тем более узок луч и тем выше энергия излучения, а, следовательно, сильнее отражение. В настоящее время на рынке присутствуют

радарные уровнемеры, работающие в диапазоне частот 6–95 ГГц. Эти уровнемеры имеют разные антенны, обладают конструктивными особенностями, используют разные методы обработки сигналов, но для всех справедливо функциональное правило: размеры антенны, ширина измерительного луча и частота излучения жестко связаны.

Высокочастотные уровнемеры позволяют производить измерения уровня сред с низкой диэлектрической проницаемостью и, следовательно, слабой отражательной способностью. Они, также, удобны в емкостях, где присутствует различное оборудование, сокращающее свободную зону для работы радара. Вместе с тем, высокочастотные уровнемеры более чувствительны к таким явлениям как запыленность, испарения, волнение поверхности рабочей среды, налипание частиц среды на поверхность антенны вследствие более интенсивного рассеивания сигнала. В подобных условиях лучше работают уровнемеры с частотой 5,8–10 ГГц.

Другой важной характеристикой влияющей на формирование сигнала является размер и тип антенны. Различают следующие типы антенн: рупорная (коническая), стержневая, трубчатая, параболическая, планарная. Чем больше размер антенны, тем более сильный и узконаправленный сигнал она излучает и, в тоже время, тем лучше прием отраженного сигнала.

Наиболее универсальный тип антенны – рупорная. Она применяется, как правило, в больших емкостях, позволяет работать с широким спектром сред по диэлектрической проницаемости, применима в сложных условиях и обеспечивает диапазон измерения до 35–40 м.

Стержневая антенна применяется в небольших емкостях с химически агрессивными средами или гигиеническими продуктами, а также в случае, когда доступ в емкость ограничен малыми размерами патрубка. Диапазон измерения – до 20 м. Поверхность стержневой антенны покрыта слоем защитной изоляции.

Трубчатая антенна представляет собой надстроенный удлиненный волновод. Она позволяет формировать наиболее сильный сигнал за счет снижения рассеивания и используется в особо сложных случаях при наличии сильного волнения поверхности среды или большого слоя густой пены либо для случая сред с низкой диэлектрической проницаемостью. Трубчатая антенна применима для небольшого диапазона измерения уровня.

Планарный и параболический типы антенн обеспечивают особо высокую точность (до ± 1 мм) и применяются в системах коммерческого учета.

5.5. Радиоизотопные уровнемеры

Радиоизотопные уровнемеры используются для точного бесконтактного измерения уровня в сложных условиях технологического процесса. Гамма-излучение обеспечивает простую и надежную систему неразрушающего контроля уровня жидкостей, твердых тел, или суспензий независимо от размеров и формы резервуара. Радиационные датчики не требуют проникновения ни в объем продукта, ни в резервуар вообще.

Поскольку измерение проводится вне удерживающей жидкость резервуара, гамма-измеритель не подвержен влиянию высоких температур и давлений, коррозии, абразивов, испарений, пыли, что могло бы воздействовать на инструмент, вводимый в измеряемую среду, или даже разрушить его. Несмотря на высокую эффективность, к этому методу измерения уровня обращаются в последнюю очередь – из-за дороговизны и специализированных требований.

Принцип действия основан на степени поглощения проходящего через вещество в резервуаре гамма-лучей, проходящих выше или ниже уровня раздела двух сред разной плотности. Радиоактивный источник гамма-излучения размещается с одной стороны резервуара. На другой стороне монтируются датчики, аналогичные счетчику Гейгера, для считывания показаний уровня. Приемник и излучатель радиационного излучения перемещаются по всей высоте емкости на специальных лентах с помощью реверсивного электромотора. Комплект прибора состоит из трех блоков: преобразователя, содержащего источник и приемник излучения; электронного блока; показывающего прибора. Если измерительная система (источник и приемник γ -лучей) расположена выше уровня измеряемой среды, поглощение излучения слабое и от приемника по кабелю на блок управления будет приходить сильный сигнал. По этому сигналу электродвигатель получит команду на спуск измерительной системы. При снижении ее ниже уровня среды поглощение γ -лучей резко увеличится, сигнал на выходе приемника уменьшится, и электродвигатель начнет поднимать измерительную систему.

Таким образом, положение измерительной системы будет отслеживать уровень в емкости (точнее, она будет находиться в непрерывном колебании около измеряемого уровня). Это положение в виде угла поворота ролика преобразуется измерительным устройством в унифицированный сигнал – напряжение постоянного тока U .

Использование приборов с радиоизотопными излучателями целесообразно там, где другие методы измерения непригодны. Однако с учетом способности радиоактивного источника пронизывать излучени-

ем типичный стальной резервуар, для работы с ним потребуются специальные разрешения, принятие мер по обеспечению радиационной безопасности обслуживающего персонала и сохранности источника, обучение операторов, поэтому это техническое решение требует тщательной продуманности и предварительной подготовки.

Появившиеся в последнее время высокочувствительные «протяженные» (длиной до 2 м) блоки детектирования для регистрации гамма-излучения позволяют в большинстве случаев отказаться от применения специализированных источников ионизирующего излучения большой активности и создавать на базе естественных радионуклидов (соли калия) экологически безопасные источники излучения.

Радиоизотопный метод измерения уровня позволяет в условиях особо жестко заданных параметров среды внутри технологического оборудования производить контроль и измерение уровня с высокой точностью и стабильностью.

Достоинства радиоизотопного метода измерения уровня:

- непрерывное, бесконтактное измерение уровня любых продуктов;
- применение даже при самых тяжелых условиях процесса: высоком давлении, высокой температуре, высокой коррозионности, токсичности, абразивности;
- применяется на любых промышленных емкостях при наличии конструкционной оснастки внутри контролируемого пространства: реакторах, автоклавах, сепараторах, резервуарах с кислотой, смесителях, циклонах.

Недостатки:

- требуется наличие лицензирования на возможность использования приборов с источниками излучения;
- дополнительное техобслуживание;
- уровнемер применяется в горнорудной, химической, металлургической промышленности, а также на предприятиях ядерно-топливного цикла.

5.6. Электрические уровнемеры

5.6.1. Емкостные уровнемеры

Уровнемер емкостный обеспечивает измерение текущего уровня и сигнализацию двух перестраиваемых предельных уровней воды, молока, пива, щелочи, кислот, нефти и нефтепродуктов, зерна и продуктов

его размола, сахара, цемента, песка, извести, а также других жидких и сыпучих сред, в том числе в емкостях, находящихся под избыточным давлением.

Работа таких уровнемеров основана на различии диэлектрической проницаемости жидкостей и воздуха. Простейший первичный преобразователь емкостного прибора представляет собой электрод (металлический стержень или провод), расположенный в вертикальной металлической трубке. Стержень вместе с трубой образуют конденсатор. Емкость такого конденсатора зависит от уровня жидкости, так как при его изменении от нуля до максимума диэлектрическая проницаемость будет изменяться от диэлектрической проницаемости воздуха до диэлектрической проницаемости жидкости.

Емкостной метод обеспечивает хорошую точность порядка 1,5 %, имеет те же ограничения, что и поплавковый – среда не должна налипать и образовывать отложения на чувствительном элементе. Емкостные датчики широко распространены и используются для определения наличия рабочей среды: как жидкой, так и сыпучей (порошки, цемент, гранулированные продукты), как электропроводной, так и неэлектропроводной. Характерным принципиальным ограничением для емкостного метода является – однородность среды, среда должна быть однородной, по крайней мере, в зоне расположения сенсорного элемента.

Некоторые емкостные датчики обеспечивают считывание через стенку неметаллического резервуара, что позволяет определять положение уровня без проникновения в резервуар или без контакта с продуктом. Датчик можно установить на плоской стенке резервуара или намотать вокруг неметаллической трубы.

Первичный преобразователь емкостного уровнемера представляет собой конденсатор, обкладки которого погружены в среду. Он может быть выполнен в виде двух концентрических труб, пространство между которыми заполняется средой, либо в виде стержня, при этом роль второй обкладки играет металлическая стенка емкости. В случае проводящей жидкости сенсорный элемент покрывается изолятором, обычно фторопластом.

Принцип действия емкостных уровнемеров основан на различии диэлектрической проницаемости контролируемой среды (водных растворов солей, кислот, щелочей) и диэлектрической проницаемости воздуха либо водяных паров.

Емкостные датчики отличаются большим разнообразием конструктивных исполнений для конкретных применений, могут быть стержневого, трубчатого типов, гибкие, тросовые и т.п. При выборе типа датчи-

ка должны учитываться в первую очередь, как состав контролируемой среды, так и ее диэлектрические свойства. Для датчиков, работающих в проводящей среде, необходимо выбирать конструкцию с изолированным электродом.

Достоинства емкостных датчиков уровня следующие:

- быстроедействие;
- простота;
- малая масса;
- высокая чувствительность;
- отсутствиимеханических подвижных инерционных частей;
- электроды с фторопластовым покрытием обеспечивают возможность их применения в агрессивных средах.

Недостатки:

- высокая чувствительность к изменению электрических свойств жидкостей, обусловленных изменением их состава, температуры и т.п.;
- образование на элементах датчика электропроводящей или непроводящей пленки вследствие химической активности жидкости, конденсации ее паров, налипания самой жидкости на контактирующие в ней элементы и т.п.

5.6.2. Кондуктометрические уровнемеры

Кондуктометрические датчики уровня применяют для контроля одного или нескольких предельных уровней жидкости, проводящей электрический ток. Действие кондуктометрического (омического) уровнемера основано на измерении сопротивления между электродами, помещенными в измеряемую среду.

Кондуктометрические уровнемеры (уровнемеры сопротивления) применяются для измерения уровня проводящих жидкостей (более 0,2 См/м): растворы щелочей и кислот, расплавленные металлы, вода, водные растворы солей, молоко и сыпучие материалы с удельной проводимостью более 1 мкС/см.

Датчики уровня кондуктометрические бывают как одностержневыми (одноэлектродными), так и многостержневыми (многочувствительными) для контроля нескольких уровней жидкости. Многостержневые кондуктометрические датчики уровня могут иметь от 1 до 5 электродов различной длины.

Первичный преобразователь кондуктометрического уровнемера представляет собой два электрода, глубина погружения которых в жидкость и определяет текущее значение ее уровня, причем одним из элект-

тродов может быть стенка резервуара или аппарата. В зависимости от уровня измеряется сопротивление между электродами. Выходным параметром преобразователя является его сопротивление или проводимость. При измерении уровня «сверхпроводящих» жидкостей (например, жидких металлов) возможно применение кондуктометрических уровнемеров с одним электродом, роль второго электрода при этом выполняет заземленный сосуд.

Применимость кондуктометрических датчиков по условиям давления и температуры рабочего процесса в емкости находится в пределах 350 °С и 6,3 МПа (как правило для стандартных исполнений 200 °С и 2,5 МПа) и определяется материалом изолятора электрода. Ограничения на применение данного типа датчиков могут накладывать такие свойства рабочей среды как сильное парение рабочей среды, сильное вспенивание, образование проводящих отложений на изоляторе или изолирующих отложений на чувствительном элементе.

Основные достоинства:

- простота и прочность;
- отсутствие движущихся механических частей;
- нечувствительны к турбулентности;
- технологическим процессом допускается высокая температура и давление;
- простая регулировка и обслуживание.

Недостатки:

- непригодны для клейких веществ и диэлектриков;
- масляные вещества могут вызывать налипание на электроды тонкого слоя непроводящего покрытия, что может быть причиной отказа.

Основные факторы, ограничивающие точность кондуктометрических уровнемеров – непостоянство площадей поперечных сечений электродов и вследствие этого непостоянство удельных сопротивлений по длине электродов, а также образование на электродах пленки (окисла или соли) с высоким удельным сопротивлением, что приводит к резкому неконтролируемому снижению чувствительности датчика.

Кроме того, на точность кондуктометрических уровнемеров существенное влияние оказывает изменение электропроводности рабочей жидкости, поляризация среды вблизи электродов. Вследствие этого погрешности кондуктометрических методов измерения уровня (даже при использовании различных компенсационных схем) достаточно высоки

(до 10 %), поэтому они находят преимущественное применение в качестве сигнализаторов уровня проводящих жидкостей.

5.6.3. Вибрационные уровнемеры

Вибрационные датчики уровня используются в качестве надежных сигнализаторов уровня жидких и сыпучих веществ различной плотности и вязкости в широком диапазоне давлений и температур).

Принцип действия датчика – вибрационный, основанный на различии резонансных колебаний чувствительного элемента – камертонного резонатора в газовой (воздушной) среде и в жидкости или сыпучем материале. Пьезоэлектрический кристалл при подаче на него напряжения создает колебания чувствительной вибрационной вилки с частотой около 1300 Гц. Изменения этой частоты колебаний камертонного резонатора в свободном и задемпфированном материалом состоянии отслеживаются электроникой в непрерывном режиме. При погружении вилки в жидкость или сыпучий продукт частота колебания вилки уменьшаются, что приводит к переключению контактов сигнализатора. Аналогично при снижении уровня жидкости или сыпучего продукта вилка переходит в состояние «сухой контакт», при этом частота колебаний вилки увеличивается, что приводит к обратному переключению контактов. Сигнал об изменении состояния контактов подается в систему управления или на исполнительные механизмы (насосы, клапаны и т.п.).

Модульная конструкция приборов позволяет использовать их в емкостях, резервуарах и трубопроводах. Благодаря универсальной и простой измерительной системе, сигнализатор уровня практически не критичен к химическим и физическим свойствам жидкости. Он работает даже при неблагоприятных условиях, таких как турбулентность, пузырьки воздуха. Вибрационные сигнализаторы уровня способны измерять уровень почти всех жидкостей. Вибрирующий элемент приводится в действие пьезоэлектрическим методом и вибрирует с механической резонансной частотой приблизительно 1200–1300 Гц.

Пьезоэлементы закреплены механически и не подвергаются воздействию теплового удара. При погружении вибрирующего элемента в измеряемую среду частота изменяется. Это изменение частоты улавливается встроенным генератором и преобразуется в команду на переключение.

Вибрационные уровнемеры, как правило, компактны и могут работать без внешней обработки сигнала, имеют встроенный блок электроники, который обрабатывает сигнал уровня и преобразует его (в зависимости от типа встроенного генератора) в соответствующий выходной

сигнал. При помощи этого выходного сигнала можно работать с подключенными дополнительными устройствами напрямую (например, системой предупреждающей сигнализации, программируемыми логическими контроллерами, насосами и т.д.).

Диапазон применимости датчиков по температуре от минус 50 до 250 °С, по давлению – до 64 атм., плотность рабочей среды – в пределах 0,5–2,5 г/см³. Помимо предельных выключателей уровня, характерно применение вибрационных сигнализаторов в качестве датчиков сухого хода в трубопроводах.

Вибрационные сигнализаторы выпускаются в широком диапазоне исполнений, в том числе для пищевых производств, взрывоопасных условий, агрессивных сред.

Достоинством вибрационных датчиков уровня является невосприимчивость к размерам частиц, плотности и влажности среды, к влиянию электрических и магнитных полей. Вибрационный датчик уровня сохраняет работоспособность даже при значительном налипании контролируемого материала на рабочие поверхности пластин резонатора. На показания вибрационных датчиков уровня не влияет наличие пены, пузырьков, взвешенных частиц в измеряемой среде. Вибрационные уровнемеры – это лучшее решение для липких сред.

Основные достоинства:

- отсутствуют движущиеся части;
- не требуют дополнительных допусков и испытаний во время эксплуатации;
- нет потребности в калибровке;
- невосприимчивы к образованию конденсата;
- нечувствительны к турбулентности, образованию пены и внешней вибрации;
- допускают любую пространственную ориентацию;
- нечувствительны к большинству физических свойств измеряемого вещества (исключением является плотность);
- могут определять уровень твердых веществ с минимальной плотностью до 0,008 г/см³.

Недостатки:

- клейкие вещества и твёрдые частицы в жидкостях могут служить причиной отказов;
- твёрдые частицы могут заклинивать колебательную вилку.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гордов А.Н. Основы температурных измерений.— М.: Энергоатомиздат, 1992 .— 304с.
2. Бикулов А.М. Поверка средств измерений давления и температуры. – М.: АСМС, 2005. – 405 с.
3. Трофимов А.И. Приборы и системы контроля ядерных энергетических установок. – М.: Энергоатомиздат, 1999.
4. Кремлёвский П.П. Расходомеры и счетчики количества веществ. – Санкт-Петербург: Изд-во Политехника, 2004. – 409 с.
5. Хансуваров К.И., Цейтлин В.Г. Техника измерения давления, расхода, количества и уровня жидкости, газа и пара: Учебное пособие для техникумов. – М.: Издательство стандартов, 1990. – 287 с.
6. Абрамов Г.С., Барычев А.В., Зимин М.И. Практическая расходометрия в промышленности – М.: ВНИИОЭНГ, 2000. – 472 с.
7. Беспалов А.В., Харитонов Н.И. Системы управления химико-технологическими процессами: учебник для вузов. – М.: Академкнига, 2007. – 690 с.
8. Рачков М.Ю. Технические средства автоматизации. – М.: МГИУ, 2007. – 186 с.
9. Иванова Г.М. Теплотехнические измерения и приборы. – М.: МЭИ, 2007 – 458 с.
10. Зайцев С.А., Грибанов Д.Д., Толстов А.Н., Меркулов Р.В. Контрольно-измерительные приборы и инструменты. – М.: Академия, 2009 – 464 с.
11. Либерман В.В., Личков Г.Г. Радарные уровнемеры. Прошое, настоящее, будущее // Промышленные АСУ и контроллеры. – 2006. – № 8. – С. 57–60.
12. Кулаков М.В. Технические измерения для химических производств. – М.: Альянс, 2008. – 424 с.
13. Шандров Б.В., Чудаков А.Д. Технические средства автоматизации. – М.: Академия, 2010 – 362 с.

Учебное издание

ДЕНИСЕВИЧ Александр Александрович
ЛИВЕНЦОВ Сергей Николаевич
ЕФРЕМОВ Евгений Викторович

МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ЯДЕРНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

Учебное пособие

Научный редактор *доктор технических наук,*
профессор С.Н. Ливенцов
Компьютерная верстка *А.А. Денисевич*

Подписано к печати 00.00.2013. Формат 60х84/16. Бумага «Снегурочка».

Печать XEROX. Усл.печ.л. 9,01. Уч.-изд.л. 8,16.

Заказ 000-13. Тираж 100 экз.



Национальный исследовательский Томский политехнический университет
Система менеджмента качества
Издательства Томского политехнического университета сертифицирова-
на



NATIONAL QUALITY ASSURANCE по стандарту BS EN ISO 9001:2008

ИЗДАТЕЛЬСТВО  ТПУ. 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30
Тел./факс: 8(3822)56-35-35, www.tpu.ru