

ПРОФЕССИОНАЛЬНОЕ ОБРАЗОВАНИЕ

Е.В. Братковский
А.В. Заводяный

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ И ПРИБОРЫ

Учебное пособие



ПРОФЕССИОНАЛЬНОЕ ОБРАЗОВАНИЕ

Е.В. Братковский, А.В. Заводяный

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ И ПРИБОРЫ



Учебное пособие

Новотроицк
2007

Содержание

1. Основы метрологии и измерительной техники	5
1.1 Основные понятия метрологии и измерительной техники	5
1.2 Классификация методов и средств измерения	8
1.3 Измерительные преобразователи и схемы дистанционной передачи показаний	11
2. Контактные методы измерения температуры	18
2.1 Понятие о температуре и температурных шкалах. Классификация методов и приборов для измерения температуры	18
2.2 Термометры расширения	22
2.3 Манометрические термометры	28
2.4 Электрические термометры сопротивления	30
2.5 Мостовые схемы измерения сопротивления термометров	36
2.6 Термоэлектрические термометры	41
2.6 Милливольтметры	50
2.7 Компенсационный метод измерения т.э.д.с.	54
3. Бесконтактная пирометрия	59
3.1 Основные понятия и законы излучения	59
3.2 Принцип действия и устройство пирометров излучения	62
4. Измерение давления и перепада давления	70
4.1 Общие сведения. Единицы измерения давления	70
4.2 Жидкостные приборы	71
4.3 Манометры с упругими чувствительными элементами	74
4.4 Электрические манометры и вакуумметры	77
4.5 Дифференциальные манометры	80
5. Измерение расхода и количества газов, жидкостей и пара	85
5.1 Классификация методов измерения расхода и количества	85
5.2 Тахометрические, скоростные и объемные устройства для измерения расхода и количества	86
5.3 Измерение расхода методом постоянного перепада давлений	98
5.4 Расходомеры с сужающим устройством	105
6. Измерение уровня, плотности тепловых потоков и теплоты сгорания топлива	111
6.1 Уровнемеры для жидких и сыпучих тел	111
6.2 Плотномеры жидкостей и газов	118
6.3 Тепломеры и термозонды	120

Введение

Теплотехнические измерения и приборы образуют обширную совокупность методов и средств измерений и представления информации о параметрах тепловых агрегатов в процессе металлургического производства, обеспечивающие их высокопроизводительную, экономичную и безопасную работу. Информативные системы автоматического контроля необходимы для создания эффективных автоматизированных систем управления технологическими процессами (АСУ ТП), а также для проведения пуско-наладочных и научно-исследовательских работ на указанных агрегатах.

Металлургические производства имеют высокую оснащенность контрольно-измерительной аппаратурой. Например, в условиях комбината с полным металлургическим циклом на каждый 1 млн. т выплавляемой стали приходится примерно 1600 датчиков температуры, 1500 манометров и дифманометров, 600 измерительных диафрагм, 2500 вторичных показывающих и регистрирующих приборов, множество различных приборов для контроля механических, электрических и других величин. Значительную часть функций по производственному контролю выполняет электронно-вычислительная техника.

К основным теплотехническим параметрам можно отнести температуры различных конструктивных элементов агрегатов, выплавляемого или нагреваемого в них металла, газов, жидкостей, сыпучих материалов; расход, давление, плотность и состав газов и жидкостей, состав металла, тепловые потоки и т.д., т.е. все те параметры, которые определяют теплотехнические режимы металлургических печей.

1. Основы метрологии и измерительной техники

1.1 Основные понятия метрологии и измерительной техники

Измерения и метрология. Важнейшей стороной существования современного общества является информация, значительную часть которой составляет измерительная. Измерению подвергаются более 2000 физических величин, общее число измерений насчитывает сотни миллиардов в год. На измерения в разных отраслях производства расходуется от 10 до 70 % затрат общественно полезного труда, в том числе около 15 % в машиностроении и 15-25 % в химии и металлургии. Брак продукции вследствие неправильно назначенных для измерения средств достигает 49 %, неумелое использование приборов и отсутствие квалифицированного персонала приводят к выпуску некачественной продукции в 51 случае из 100 случаев брака.

Анализ тенденций развития науки, техники и технологии позволяет сделать вывод о том, что наблюдается все больший рост требований к точности измерений, их оперативности, усложнению самих измерительных систем. Автоматизация производства и расширение использования гибких производств предопределили необходимость полной автоматизации измерений, интеллектуализации и роботизации этого процесса.

Д.И. Менделеев считал, что "наука начинается с тех пор, как начинают измерять, а точная наука немыслима без меры". Именно наличие меры позволяет получить количественный результат, объективность которого гарантирует весь комплекс специальных средств измерения, условий и процедур осуществления измерения.

Измерение следует рассматривать с технической, метрологической и гносеологической точек зрения. С технической стороны измерение представляется как совокупность операций по применению технического средства для измерения, с метрологической - сравнение измеряемой физической величины с ее единицей. Гносеологический аспект сводится к получению значения и погрешности измеряемой величины в удобной для дальнейшего использования форме.

Измерение является наиболее полным способом объективного количественного выражения физических величин. Суть измерения заключается в проведении эксперимента, который позволяет установить однозначное соответствие между единицей измеряемой физической величины $[Q]$ и самой величиной $Q = n[Q]$, где n - число единиц. Метрология рассматривается как наука об измерениях, методах и средствах обеспечения их единства и способах достижения требуемой точности при измерениях. Метрология изучает измерения физических величин и образующие измерение элементы: физические величины и их единицы, методы и методики измерений, погрешности средств и результатов измерений.

Метрология решает вопросы обеспечения единства измерений при требуемой их точности. Это достигается единой системой физических единиц, разработкой унифицированных измерительных устройств в стандарте Государственной системы приборов (ГСП) и эталонной базы для передачи размера физических величин.

В стране насчитывается 150 государственных и несколько сот вторичных эталонов, парк образцовых приборов. Метрологические правила и нормы изложены Государственной системой обеспечения единства измерений (ГСИ). Передача размера единиц измерения средствам измерения осуществляется по поверочным схе-

мам, представляющим пирамиды с государственными эталонами в вершине и рабочими средствами измерений в основании. Иерархическая схема передачи размера единицы измерения представляется в виде: государственный эталон → вторичные эталоны → образцовые средства измерений → рабочие средства измерений.

Метрология связана с разработкой унифицированных методик измерения, включающих единые требования к методу и условиям измерений, а также к квалификации персонала, нормированию пределов погрешностей измерения, установлению границ их достоверности.

Метрология, как и любая наука, состоит из фактов, образующих науку; представлений, их вызывающих, и слов, их выражающих. Фактами в метрологии считаются физические величины, их единицы, средства измерений; измерения, методы и методики, результаты, погрешности измерений и средств измерений. Представление является отражением в сознании ранее воспринятых фактов. Представление, отражающее существенные стороны, называют понятием.

В технике понятия и представления стараются унифицировать в виде терминов. Метрологические понятия закреплены ГОСТ 16263-70 "ГСИ. Метрология. Термины и определения".

Вопросами метрологии занимаются специальные учреждения, возглавляемые Государственной метрологической службой при Госстандарте СССР. Эти службы, помимо обеспечения единства измерений, призваны обеспечивать метрологическую подготовку производства, создание и метрологическую аттестацию несерийных средств измерений, метрологическую экспертизу конструкторской и технологической документации.

Таким образом, метрология призвана обеспечить качество измерений. Под качеством измерений понимают совокупность параметров измерений, обеспечивающих своевременное получение необходимых результатов с требуемыми точностными характеристиками. В качестве параметров измерений рассматриваются:

а) точность результатов измерений, определяемая в соответствии с погрешностями средств и методов измерений. Точностью называют характеристику, отражающую близость к нулю погрешности результата. Более точный результат имеет меньшую погрешность;

б) сходимость, определяющая близость друг к другу повторных результатов, выполненных в одинаковых условиях измерения одним и тем же методом; Количественно эта характеристика оценивается разностями полученных значений или отсчетов показаний измеряемой величины, а также размахом, средней квадратической или средней арифметической погрешностью. Воспроизводимость отражает близость результатов измерений одной и той же величины, полученных в разных местах разными методами и средствами, разными субъектами измерения, в разное время, но приведенных к одним и тем же условиям измерения. Она характеризуется средней квадратической погрешностью сравниваемых групп измерений;

в) оперативность получения измерительной информации, определяемая методикой и уровнем автоматизации процесса измерений и обработки результатов;

г) единство измерений, обусловленное применением узаконенных единиц, сохранением их размера в пределах установленной погрешности, использованием стандартизованных и аттестованных средств и методик измерения;

д) эргономические и экологические показатели системы "измеритель - объект измерения - средство измерения", характеризующиеся уровнем вредных воздействий на персонал и окружающую среду.

Физические величины и единицы физических величин.

Физической величиной называют определенное свойство материального объекта, качественно общее множеству объектов, но количественно индивидуальное для каждого из них. Они подразделяются на величины материального мира и величины идеальных моделей, которые делятся на измеряемые, оцениваемые и вычисляемые.

Количественную определенность присущую конкретному явлению, называют размером или значением физической величины. Различают истинное и действительное значение физической величины. Истинное значение является идеальным представлением измеряемой величины, оно остается неизвестным в силу погрешности применяемых средств, колебаний условий измерений и т.п. Получаемый при измерении результат является действительной величиной. Эта величина получается экспериментально при измерении и настолько близка истинному значению, что при практическом применении может его заменить. В качестве действительной величины при поверке принимается результат, показанный образцовым прибором; при однократном измерении результат, полученный при измерении более точным прибором; при многократных измерениях среднее арифметическое значение.

При измерениях оперируют понятиями, влияющей физической величины и физического параметра. Влияющая величина не измеряется при измерении, но оказывает влияние на средство и объект измерения, искажая результат. Измеряемая величина может иметь частные особенности, которые и являются ее параметрами. Например, при измерении напряжения переменного тока его частота и несинусоидальность являются параметрами.

Единицей физической величины является физическая величина условно принятого фиксированного размера, равного 1, используемая для сравнения с однородными ей величинами. Совокупность единиц физических величин, образованных в соответствии с заранее оговоренными принципами, называют системой единиц.

Единицы физических величин являются исторически изменяющимися категориями, претерпевшими в ходе технического развития переход от субъективных (например, единицы длины - ладонь, фут - длина ступни; площади - колодец - площадь, которую можно получить из одного колодца и т.п.) к объективным метрическим.

В настоящее время принята Международная система единиц (СИ), включающая 7 основных единиц, 2 дополнительные единицы, 27 производных единиц и 12 приставок для образования кратных и дольных единиц. В нашей стране единицы, обязательные для применения, установлены ГОСТ 8.427-81, который соответствует стандарту СЭВ СТ 1052-78 «Единицы физических величин».

Основными единицами СИ являются метр, килограмм, секунда, ампер, кельвин, моль, кандела; дополнительными единицами служат радиан и стерадиан. Производные единицы образуются в соответствии с уравнением, связывающим ее с основными и другими производными единицами. Например, скорость определяется уравнением $v = \partial l / \partial t$, м/с, где l - расстояние, м; t - время, с. Выражение, опреде-

ляющее эту связь, называют уравнением размерности физической величины, для приведенного примера формула размерности - $[v] = [l]/[t]$.

Теплофизические единицы, применяемые на практике, в большинстве являются производными или внесистемными единицами: силы - ньютон; давления - паскаль или миллиметр водяного или ртутного столба; теплоты и энергии - джоуль или калория; мощности - ватт или лошадиная сила и др.

Кратные единицы величины в целое число раз больше, а дольная - меньше системной или внесистемной единицы физической величины; например, $1 \text{ м} = 10^2 \text{ см}$ - кратная единица длины, а $1 \text{ м} = 10^{-3} \text{ км}$ - дольная единица длины.

1.2 Классификация методов и средств измерения

Измерение - процесс получения информации, заключающийся в сравнении опытным путем измеряемых и известных величин или сигналов, выполнения необходимых логических операций и представления информации в удобной для восприятия и передачи форме.

Измерение физической величины сводится к совокупности целесообразных операций по использованию технического средства, хранящего единицу физической величины, для сравнения размера этой величины с ее единицей с целью получения значения в форме, удобной для использования. Объектом измерения является физическая величина.

Измерение подразумевает акт взаимодействия компонентов измерительной системы, включая и субъект измерения. Схема и структура операций измерения представлена на рисунке 1.1.

По системообразующим признакам измерения можно классифицировать следующим образом: по точности - равноточные и неравноточные; по числу измерений - однократные и многократные; по изменению измеряемой величины времени - статические и динамические; по назначению - технические и метрологические; по выражению результата - абсолютные и относительные; по методам получения результата - прямые, косвенные, совместные, совокупные.

К равноточным измерениям относят измерения, выполненные при одних и тех же условиях одинаковыми по точности средствами измерений, а к неравноточным те, когда хотя бы одно из вышеперечисленных условий не выполняется. К многократным измерениям обычно относят измерения, производимые $n \geq 4$ раз.

Динамические измерения в отличие от статических характеризуются тем, что значение измеряемой величины в процессе его получения изменяет свой размер и требует точной фиксации времени в момент измерения.

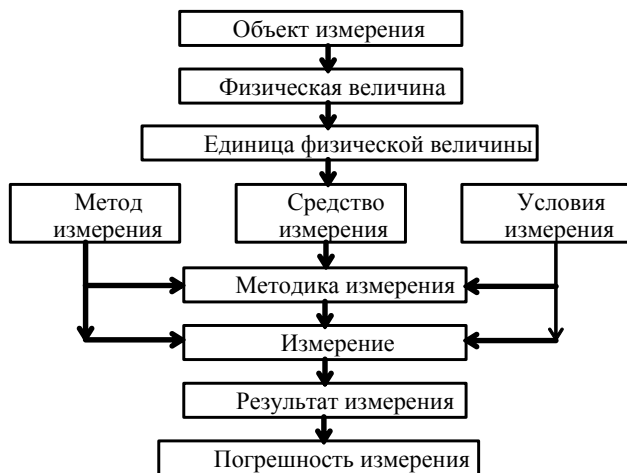


Рисунок 1.1 - Операции измерения

К техническим измерениям относят измерения, производимые при помощи рабочих средств с целью контроля параметров, управления процессами, получения фактографического материала, диагностики и т.п. Метрологические измерения преследуют цель воспроизведения единиц физических величин или передачи их размера рабочим средствам измерения.

При прямых измерениях значение считывают непосредственно с отсчетного устройства средства измерения, а при косвенном методе искомое значение вычисляется с помощью функционального соотношения, связывающего находимую физическую величину с результатами прямых, косвенных, совокупных, совместных измерений независимых аргументов определяемой величины X_1, X_2, \dots, X_n , $f = F(X_1, \dots, X_n)$. Прямые измерения называют абсолютными.

Совокупные измерения предполагают измерения нескольких однородных величин в различных сочетаниях, значения которых определяют путем решения системы уравнений.

К совместным измерениям относят одновременные измерения нескольких неоднородных величин для установления зависимости между ними. Искомые величины при совокупных и совместных измерениях определяются из систем уравнений, связывающих значения определяемых величин со значениями величин, полученных при прямых или косвенных измерениях. Примером метода совместного измерения является определение значения параметров R_0 , а β зависимости сопротивления термопреобразователя от температуры

$$R_T = R_0(1 + \alpha \cdot T + \beta \cdot T^2).$$

При этом осуществляются прямые измерения трех значений температуры T_1 , T_2 , T_3 . Затем из решения системы уравнений получают значения R_0 , α и β .

$$R_{T_1} = R_0(1 + \alpha \cdot T_1 + \beta \cdot T_1^2);$$

$$R_{T_2} = R_0(1 + \alpha \cdot T_2 + \beta \cdot T_2^2);$$

$$R_{T_3} = R_0(1 + \alpha \cdot T_3 + \beta \cdot T_3^2).$$

Средствами измерений называют устройства или комплексы технических устройств, предназначенные для измерений, имеющие нормированные технические характеристики, хранящие одну или несколько воспроизводимых в течение определенного времени единиц физических величин. Они включают: меры, измерительные приборы, измерительные установки, измерительно-вычислительные комплексы, измерительные преобразователи, измерительные устройства, измерительные принадлежности и средства сравнения.

Меры - это средство измерений, воспроизводящее и хранящее физическую величину одного или нескольких размеров. Однозначные меры воспроизводят единицы измерения или их кратные или дольные залоги: гири, плоскопараллельная концевая мера длины. Многозначные меры образуются из наборов однозначных мер: магазины резисторов, наборы гирь, калибров.

Измерительные преобразователи - средства, предназначенные для Выработки сигнала измерительной информации в форме, удобной для передачи, дальнейшего преобразования, обработки и хранения, но не воспринимаемой непосредственно наблюдателем. Преобразуемая величина называется входной, а результат преобразования - выходной величиной; соотношение между ними задают функцией преобразования. Преобразователи по выполняемым функциям и месту в измерительной цепи делятся на первичные (преобразуют измеряемую величину в информативный сигнал в соответствии с заложенным в I принципе действия свойством; термоэлектрические, индукционные, пьезоэлектрические в т.п.); передающие (преобразуют измеряемую в сигнал, удобный для передачи и приема) и промежуточные (преобразование сигналов в форму и вид, удобный для организации работы измерительных приборов, систем, комплексов и устройств).

Преобразователи широко применяются в измерительных цепях.

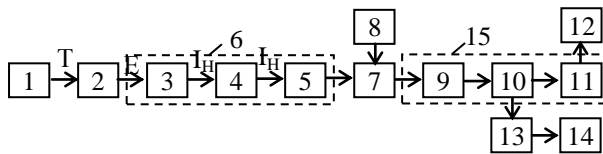


Рисунок 1.2 – Блок-схема системы измерения температуры

Источник информации о температуре 1 воздействует на первичный преобразователь - термоэлектрический преобразователь 2, в котором неэлектрическая величина (температура Т) преобразуется в электрический сигнал (т.э.д.с. Е). Электрический сигнал поступает на нормирующий промежуточный преобразователь 3 для преобразования информации о температуре в токовый сигнал I_n . Ток подается на кодирование сигнала в аналого-цифровой преобразователь 4, дискретные сигналы которого поступают в передатчик 5 и на канал связи 7. При передаче возможно на-

ложение помехи 8. Дискретные сигналы поступают на интерфейс приемника 9 и декодирование сигнала в преобразователь 10 с последующим преобразованием сообщения в преобразователе-дешифраторе 11 из двоичного кода в десятичный. Декодированное сообщение индуцируется оператору на средстве отображения информации 12. Результат может регистрироваться на аналоговом измерительном приборе 14 после промежуточного преобразования кодовой записи в аналоговый сигнал в цифро-аналоговом преобразователе 13. Модули 6 и 15 выполнены в виде интегральных микросхем.

Измерительные приборы представляют собой средства измерения, предназначенные для выработки сигнала измеряемой информации в форме, доступной для непосредственного восприятия наблюдателем (потенциометр, мост и т.п.).

Задачей измерительной техники является создание систем, включающих измерительные приборы и обеспечивающих измерение без участия человека, т.е. систем автоматического контроля. Измерительные приборы классифицируются по ряду признаков:

- по роду измеряемой величины для измерения: температуры (термометры, пирометры); давления и разрежения (манометры, вакуумметры, тягонапорометры, барометры и т.п.); количества и расхода вещества, энергии (расходомеры, счетчики); уровня (уровнемеры и сигнализаторы); состава (газоанализаторы, концентратометры);

- по назначению: технические (рабочие) - измерение технологических и технических параметров; контрольные - проверка технических средств измерения; лабораторные - для применения в экспериментальной технике; образцовые - проверка контрольных измерительных приборов; эталонные - проверка образцовых приборов;

- по характеру представления информации и промышленному назначению: показывающие - имеющие только визуальный отсчет результата измерения; регистрирующие - имеющие устройства для регистрации (записи) результата измерения; индикаторные - показывающие только наличие или отсутствие сигнала; обработки информации;

- по дистанционному признаку: местного контроля; дистанционного контроля; телеметрического контроля;

- по характеру регистрации и контроля измеряемого сигнала во времени: непрерывного (аналогового) действия; дискретного действия;

- по принципу действия: механические; электрические; гидравлические; пневматические; радиоактивные и т.п.

- по условиям измерения: стационарные; переносные;

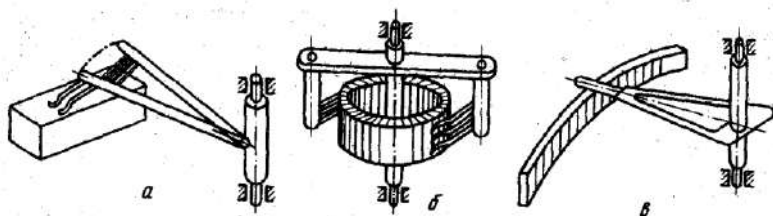
- по габаритам: нормальные (полногабаритные); малогабаритные; миниатюрные;

- по числу контролируемых величин: одноточечные; многоточечные; многоканальные.

1.3 Измерительные преобразователи и схемы дистанционной передачи показаний

Измерительные преобразователи подразделяются на первичные, промежуточные и передающие. Первичные преобразователи являются начальным структур-

ным элементом в измерительной цепи, непосредственно реагирующим на измеряемую физическую величину, поэтому их устройство зависит от особенностей измеряемой величины. Принцип действия и конструкции первичных преобразователей рассмотрены в разделах учебника, посвященных измерениям конкретных параметров (давления, температуры, состава и т.д.). Устройство промежуточных и передающих преобразователей же связано непосредственно с видом контролируемой физической величины. Одни и те же преобразователи используют при измерении различных параметров. Основными промежуточными и передающими преобразователями являются реостатные (потенциометрические), индуктивные, индукционные, токовые, частотные, пневматические.



а – стержневые; б – кольцевые; в – дуговые

Рисунок 1.3 – Потенциометрические преобразователи

Реостатные (потенциометрические) преобразователи (реостаты и потенциометры) представляют собой переменные электрические сопротивления, величина которых зависит от положения токосъемного контакта Х. Реостаты включаются в цепи, где измеряется их сопротивление R , а потенциометры - в цепи, где измеряются напряжения V , т.е. переменное сопротивление служит делителем напряжения. Характеристики реостатов и потенциометров выражаются зависимостями

$$R = f(X); U = f(X).$$

Наибольшее распространение получили реостаты и потенциометры непрерывной намотки, в которых сопротивлением служит, намотан в один ряд на каркас проволока, по зачищенной поверхности которой скользит токосъемный контакт. Различные типы потенциометрических преобразователей. Каркасы изготавливают из изоляционных материалов (пластмассы, текстолита, керамики); для намотки применяют проволоку из благородных металлов платины, золота, палладия, а также из константана, манганина, рома).

Использование потенциометров в измерительных цепях приводит к возникновению погрешностей. Наличие зоны нечувствительности, анной тем, что перемещение контакта в пределах одного витка проволоки не вызывает изменения выходного сигнала, неравномерность характеристики, вызванная непостоянством диаметра, удельного сопротивления провода, шага намотки, натяжения провода, люфт в механизме перемещения контакта приводят к появлению погрешности этого вида преобразователей.

Основной недостаток реостатных и потенциометрических преобразователей связан с наличием электрического подвижного контакта и возможностью его износа, загрязнения, разрыва. Этого недостатка лишены индуктивные и индукционные преобразователи.

Индуктивные преобразователи служат для преобразования перемещения в изменение индуктивности, а индукционные - для преобразования перемещения, в изменение взаимной индукции между двумя более, катушками. Индуктивный преобразователь представляет собой электромагнитную цепь, состоящую из катушки 1, мотанной на неподвижном, сердечнике 2, и подвижного сердечника 3. При изменении положения δ подвижного сердечника (входная величина) относительно неподвижного меняется магнитное сопротивление $R_\delta = 2\delta/(\mu_0 S)$ воздушных зазоров δ при постоянном магнитном сопротивлении сердечника R_c и индуктивность катушки L . Эта зависимость выражается формулой

$$L = [0,4 \cdot \pi \cdot \omega^2 / (R_c + R_\delta)] \cdot 10^{-8}.$$

где ω частота тока, Гц; S - площадь зазора, см²; $\omega_0 = 1,26 \cdot 10^{-6}$ - магнитная проницаемость воздушного зазора, Г/м.

При прочих неизменных условиях индуктивность зависит только от величины воздушного зазора, т.е. от перемещения x подвижного сердечника. На рисунке приведен пример выполнения индуктивного преобразования с одной катушкой 1, охватывающей перемещающийся внутри неё сердечник 3.

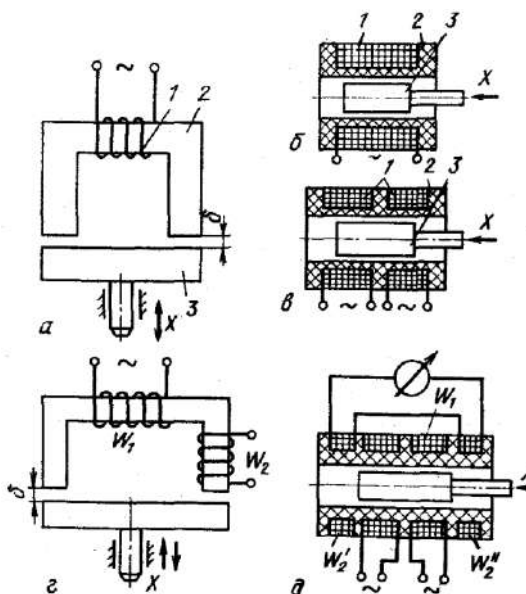


Рисунок 1.4 - Индуктивные и индукционные преобразователи

Для увеличения чувствительности применяют преобразователи с двумя катушками. В среднем положении сердечника сигнал на выходе равен нулю, а при переходе сердечника через среднее положение сигнал меняет фазу на 180° .

В индукционном преобразователе имеются две катушки, содержащие W_1 и W_2 витков. При изменении магнитного сопротивления R_M цепи, например при изменении воздушного зазора δ , меняется взаимоиנדукция M между катушками, которая определяется формулой

$$M = W_1 \cdot W_2 / R_M.$$

Одна из катушек является первичной, питаемой от источника переменного тока. Во вторичной обмотке наводится э.д.с., которая зависит от изменения взаимоиנדукции. Выходной величиной преобразователя является э.д.с., величина которой зависит от положения сердечника x .

Разновидность индукционного преобразователя, который называют дифференциально-трансформаторным. В нем имеются первичная питающая катушка W_1 и две вторичные W'_2 и W''_2 , которые включены дифференциально, т.е. навстречу друг другу, что повышает чувствительность устройства.

В частотном преобразователе, входной сигнал модулирует (изменяет) частоту выходного сигнала. До момента времени τ_1 входной сигнал имел величину X_1 , а выходной – частоту f_1 . После изменения входного сигнала до значения X_2 частота выходного сигнала стала f_2 и затем соответственно X_3 и f_3 .

Основным элементом частотных преобразователей является генератор высокой частоты с устройством для модуляции выходной частоты в зависимости от величины входного сигнала.

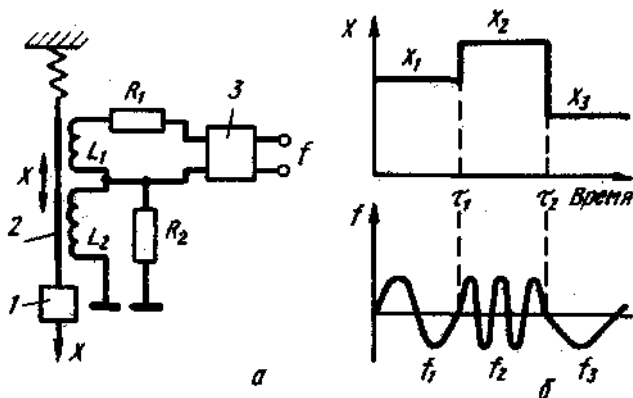


Рисунок 1.5 - Частотный преобразователь

Входная величина в виде перемещения X через передачу 1 изменяет положение электропроводного экрана 2 относительно катушек индуктивного датчика L_1 и L_2 , меняя тем самым величины индуктивностей. Для генератора, показанного на

схеме и имеющего, помимо контуров , R_1, L_1 и R_2, L_2 , усилитель 3, частота автоколебаний, возникающих в контуре , определяется формулой

$$f = \sqrt{R_1 \cdot R_2 / (L_1 \cdot L_2)} / 2\pi \cdot$$

С выхода усилителя 3 модулированное по частоте напряжение поступает либо непосредственно на дискретное регистрирующее устройство, либо на демодулятор, где превращается в непрерывный электрический сигнал, пропорциональный входной частоте, и далее на регистрирующий прибор. Диапазон рабочих частот преобразователей 4-8 кГц.

Схема передачи сигналов с использованием потенциометрических преобразователей. Потенциометр R_1 расположен в первичном преобразователе, а потенциометр R_2 , электронный усилитель и реверсивный двигатель РД - в измерительном приборе. Подвижный контакт потенциометра R_1 перемещается в соответствии с измеряемой величиной X . Подвижный контакт потенциометра R_2 приводится в движение двигателем РД. Если подвижные контакты обоих потенциометров находятся в одинаковых положениях, то напряжение на входе усилителя $\Delta U = 0$ и двигатель не вращается. Если контакт потенциометра первичного преобразователя из-за очередного изменения контролируемого параметра смещается, то на выходе усилителя появляется напряжение рассогласования $\Delta U \neq 0$, которое усиливается и приводит в движение реверсивный двигатель и контакт Потенциометра R_2 для устранения рассогласования. В схеме используется фазочувствительный усилитель, так как фаза сигнала разбаланса на входе усилителя зависит от взаимного расположения подвижных контактов потенциометров и меняется в момент прохождения состояния баланса одним из контактов. Изменение фазы сигнала разбаланса приводит к изменению фазы выходного сигнала усилителя и к перемене направления вращения двигателя, поэтому двигатель называется реверсивным.

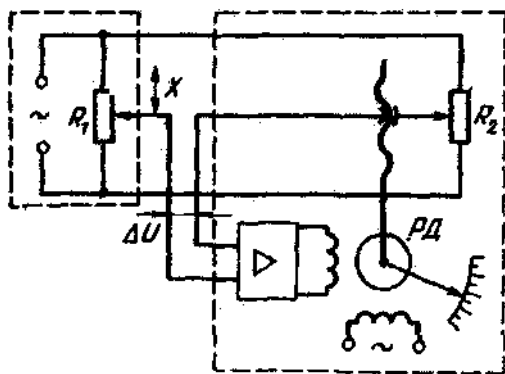


Рисунок 1.6– Потенциометрическая система передачи показаний

Широкое распространение получила дифференциально-трансформаторная система передачи показаний, схема которой приведена на рисунке. Эта схема, так

Если сердечник такого преобразователя располагается посередине катушки, то сигнал на выходе вторичной обмотки (клеммы u и k), равен нулю, так как токи в обеих ее секциях равны, а встречное соединение секций обеспечивает вычитание токов. При смещении сердечника от среднего положения на выходе вторичной обмотки появляется сигнал той или иной фазы в зависимости от того, сместится сердечник вверх или вниз от среднего положения. Вторичные обмотки преобразователей ДТ1 и ДТ2 включены навстречу друг другу, и разность их сигналов поступает на входные клеммы ν и z усилителя, с выходных клемм d и e которого усиленный управляющий сигнал приводит в движение двигатель РД и сердечник преобразователя ДТ2 в направлении устранения разбаланса. Таким образом, сердечник преобразователя ДТ2 постоянно следит за перемещением сердечника преобразователя ДТ1. Одновременно с сердечником двигатель РД перемещает стрелку на шкале прибора, положение которой соответствует положению сердечника первичного преобразователя и величине измеряемого Параметра (в данном случае давления P). Переменное сопротивление R_3 вместе со вторичной обмоткой трансформатора вторичного прибора служит для корректировки нуля прибора. Сопротивлениями R_1 и R_2 произво-

дятся настройка системы и согласование перемещений сердечников, так как они позволяют несколько варьировать выходными сигналами преобразователей. Рассмотренная система обеспечивает возможность передачи сигналов измерительной информации на расстояния до 250 м без появления дополнительной погрешности.

2. Контактные методы измерения температуры

2.1 Понятие о температуре и температурных шкалах. Классификация методов и приборов для измерения температуры

Одним из основных параметров, определяющих ход металлургических процессов, является температура. Работа печных агрегатов характеризуется температурой металла, шлака, топлива, защитной атмосферы, дымовых газов, кладки, а также других сред и элементов рабочего пространства. От точного и надежного измерения данной величины в значительной мере зависит эффективность функционирования АСУ ТП. Многообразие задач предопределило появление большого числа различных методов и средств контроля температуры.

Тепловое состояние тела (степень его нагретости) определяется средней кинетической энергией поступательного движения молекул данного тела. Следовательно, и температура, характеризующая тепловое состояние физического объекта, является статистической величиной, поэтому ее измерение имеет смысл только в телах, состоящих из достаточно большого числа молекул.

Разный уровень температур двух тел, находящихся в контакте, определяет направление теплопередачи: тело с более высокой температурой отдает свою внутреннюю энергию телу с более низкой температурой до тех пор, пока их температуры не станут равными.

Таким образом, температура тела - параметр состояния, который определяет направление передачи тепловой энергии. Измерить температуру непосредственно, как плотность или линейные размеры, невозможно, поэтому температуру определяют косвенно, по изменению физических свойств различных тел, получивших название термометрических, например, объемное расширение, изменение электрических свойств: электрической проводимости, термоэлектродвижущей силы (т.э.д.с.) и т.п.

Для определения изменяющегося уровня теплового состояния необходимо иметь непрерывный ряд значений выбранного свойства термометрического вещества, т.е. температурную шкалу, под которой таким образом понимается непрерывная совокупность чисел, линейно связанных с числовыми значениями данного достаточно точно измеряемого физического свойства, являющегося однозначной и монотонной функцией температуры.

Для построения известных температурных шкал обычно используют две постоянные реперные точки t_1 и t_2 , в качестве которых выбирают температуры фазового равновесия однокомпонентных систем.

Данным точкам присваивают произвольные числовые значения и предполагают, что термометрическое свойство E используемого в термометре вещества линейно изменяется с температурой t

$$t = kE + D,$$

где k - коэффициент пропорциональности; D - постоянная.

Для определения температур вычисляют постоянные k и D строят условную температурную шкалу.

На этом принципе основаны шкалы Фаренгейта ($^{\circ}\text{F}$), Реомюра ($^{\circ}\text{R}$) и Цельсия ($^{\circ}\text{C}$), появившиеся в XIX в. В них за опорные (реперные) точки принимались температуры замерзания и кипения воды. Температура замерзания воды принимается за 0°R , 0°C и 32°F , точка ее кипения - 80°R , 100°C и 212°F (в шкале Фаренгейта имеется еще одна реперная точка, равная 100°F - это температура тела здорового человека). Однако указанные температурные интервалы разбивались на различное количество одинаковых частей - градусов. Указанные шкалы отличаются только видом зависимости $E=f(t)$ и поэтому могут быть пересчитаны одна в другую по формуле

$$n^{\circ}\text{C} = 0,8n^{\circ}\text{R} = (1,8n + 32)^{\circ}\text{F}.$$

Применение указанных типов шкал при использовании различных термометрических веществ, таких как спирт, ртуть и т.п., давало хорошие результаты в узком диапазоне температур. Однако с развитием измерительной техники было обнаружено, что различные термометры хорошо воспроизводят только две реперные точки, а в промежуточных значениях шкал, вследствие зависимости свойств заполнителя и сосуда (коэффициентов линейного расширения) от температуры, их показания расходятся, причем эти различия особенно ярко проявляются при высоких и очень низких температурах.

Более точными являются условные газовые температурные шкалы, так как свойства газов меньше зависят от уровня измеряемых температур. Шкала водородного газового термометра с диапазоном $(-25 \div 100)^{\circ}\text{C}$ в конце XIX в. признана "нормальной" и положена в основу теплотехнических измерений. Температура в нем фиксировалась по изменению давления газа при постоянном объеме.

В середине прошлого века Кельвин предложил термодинамическую шкалу, основанную на втором законе термодинамики и независимую от свойств термометрического вещества. В указанной шкале за нулевое значение принята температура абсолютного нуля. Один градус по термодинамической температурной шкале - градус Кельвина (К) - соответствует такому повышению температуры, которое равно $1/100$ части работы по циклу Карно между точками плавления льда и кипения воды при нормальном атмосферном давлении. Деление на 100 равных частей было предложено для сохранения преемственности со стогоградусной шкалой Цельсия.

Термодинамическая шкала тождественна температурной шкале идеального газа, которую можно получить, вводя поправки (от $0,001$ до $0,5^{\circ}\text{C}$) к показаниям реального газового термометра. Последние могут применяться для воспроизведения термодинамической стогоградусной шкалы до температур, не превышающих 1200°C . Необходимо также отметить, что газовые термометры достаточно сложные приборы, пользоваться которыми на практике неудобно. Для обеспечения единства измерений в широком интервале температур от $0,01$ до 100000 K в стране с 1.011976 г. установлены практические температурные шкалы и регламентированы методы воспроизведения, позволяющие получать температуры, близкие по значениям к термодинамическим температурам. Единицей температуры в практических шкалах, так же как и в термодинамической шкале, является кельвин (К). Допустимо применение и другой единицы температуры - градус Цельсия ($^{\circ}\text{C}$). Между кельвином и градусом Цельсия существует следующее соотношение

$$T = t + 273,15,$$

где t - температура, $^{\circ}\text{C}$; T - температура, K .

Единица кельвин определена как $1/273,16$ часть термодинамической температуры тройной точки воды. Разность температур выражается либо в кельвинах, либо в градусах Цельсия.

В производственной практике наиболее широко используется Международная практическая температурная шкала 1968г. (МПТШ-68), установленная для интервала температур от 13,81 до 6300 K . МПТШ-68 базируется на эталонных приборах и 11 реперных точках, которым присвоены точные значения температур. Реперные точки воспроизводятся с высокой точностью при помощи фазовых равновесий ряда чистых веществ. Платиновый термометр сопротивления используется в интервале температур от 3,81 до 903,89 K (от $-259,34$ до $+630,74$ $^{\circ}\text{C}$), а термоэлектрический платинородий-платиновый термометр от 903,89 до 1337,58 K ($630,74$ - $1064,43$ $^{\circ}\text{C}$). Выше 1337,58 K температуру определяют с помощью закона излучения Планка.

Таблица 2.1 - Некоторые реперные точки МПТШ-68

Состояние фазового равновесия	Температура	
	K	$^{\circ}\text{C}$
Равновесие между твердой, жидкой и парообразной фазами равновесного водорода (тройная точка равновесного водорода)	13,81	-259,34
Равновесие между твердой, жидкой и парообразной фазами кислорода (тройная точка кислорода)	54,361	-218,789
Равновесие между жидкой и парообразной фазами кислорода (точка кипения кислорода)	90,188	-182,962
Равновесие между твердой, жидкой и парообразной фазами воды (тройная точка воды)	273, 16	0,81
Равновесие между жидкой и парообразной фазами воды (точка кипения воды)	373,15	100
Равновесие между твердой и жидкой фазами цинка (точка затвердевания цинка)	692,73	419,58
Равновесие между твердой и жидкой фазами серебра (точка затвердевания серебра)	1235,08	961,93
Равновесие между твердой и жидкой фазами золота (точка затвердевания золота)	1337,58	1064,43
Примечание. Значения температур (за исключением тройных точек) даны для состояния равновесия при давлении $P=101,325$ kPa .		

Специальными поверочными схемами осуществляется передача с определенной точностью практических температурных шкал от эталонов к образцовым средствам измерений, а от них - рабочим измерительным устройствам и приборам.

Эталоны имеют наивысшую метрологическую точность, образцовые приборы 1-го, 2-го и 3-го разрядов имеют большую погрешность, увеличивающуюся с номером разряда.

В научно-технической и производственной практике существует значительное число разнообразных устройств для измерения температуры твердых, жидких и газообразных веществ, использующих различные термометрические свойства и носящих название термометр. Термометр - это прибор, применяемый для измерения температуры путем преобразования ее в показания или сигнал измерительной информации, являющийся известной функцией температуры. Часть термометра, преобразующая тепловую энергию в другой вид энергии, называется чувствительным элементом.

Известные приборы для контроля температуры можно разделить на две большие группы: контактные и бесконтактные. Первые отличаются тем, что у них чувствительный элемент термометра приводится в непосредственное соприкосновение с измеряемой средой.

Таблица 2.2 – Пределы применения термометров для измерения температуры в промышленных условиях

Термометрическое свойство	Наименование устройства	Пределы длительного применения, °С	
		нижний	верхний
Контактный метод измерения			
Тепловое расширение	Жидкостные стеклянные термометры	-200	650
	Дилатометрические и биметаллические термометры	-60	1000
Изменение давления	Манометрические термометры	-200	600
Изменение электрического сопротивления	Электрические термометры сопротивления (металлические)	-260	1100
	Полупроводниковые термометры сопротивления (терморезисторы)	-100	300
Термоэлектрический эффект (т.э.д.с.)	Стандартные термоэлектрические термометры	-200	2500
	Нестандартные термометры термоэлектрические	-200	3000
Бесконтактный метод измерения			
Тепловое излучение	Пирометры спектрального отношения	300	4000
	Радиационные пирометры	30	2500
	Пирометры частичного излучения		
	Фотоэлектрические пирометры	450	4000
	Оптические пирометры	800	6000

2.2 Термометры расширения

Стеклянные жидкостные термометры. Для измерения температуры в лабораторных условиях и промышленной практике широко применяют стеклянные жидкостные термометры, являющиеся самым старым видом термометров. Их характеризуют достаточно высокая точность, невысокая стоимость, простота эксплуатации.

Принцип действия термометра основан на зависимости между температурой и объемом термометрической жидкости, заключенной в стеклянной оболочке. Зафиксировать изменение положения верхней границы столбика жидкости возможно вследствие разности температурных коэффициентов объемного расширения жидкости и стекла. Из-за увеличения объема резервуара видимое изменение объема жидкости ниже действительного.

Наиболее широко в качестве термометрической жидкости используется ртуть. Применяют также органические заполнители: толуол, этиловый спирт, керосин, пентан и др.

Наибольшее распространение получили термометры с ртутным заполнением, так как ртуть находится в жидком состоянии в широком диапазоне температур (верхний предел может быть доведен до 1200 °С с помощью увеличения давления в капилляре и применения для его изготовления плавленого кварца); не смачивает стекла, что позволяет использовать капилляры с небольшим диаметром канала (до 0,1 мм) и обеспечить высокую точность измерения (ртутные образцовые термометры 1-го разряда имеют доверительную погрешность $\varepsilon = 2\sigma = 0,002 \pm 0,2$ °С). Ртуть имеет в 6-8 раз меньший, температурный коэффициент объемного расширения, чем другие заполнители. Это снижает чувствительность ртутных термометров. Однако для термометров, градуированных при неполном погружении, погрешности из-за выступающего столбика будут в 6-8 раз меньше, чем у нертутных (при прочих равных условиях измерения).

Органические заполнители характеризуются более низкой температурой применения, меньшей стоимостью и вредностью в эксплуатации и производстве. Вследствие смачивания стекла термометры с органическими термометрическими жидкостями имеют меньшую точность отсчета.

Стеклянные жидкостные термометры конструктивно делятся на два основных типа: палочные и со вложенной шкалой.

Шкала у палочных термометров непосредственно на толстостенном капилляре, а у второго типа устройств – на прямоугольной стеклянной пластинке молочного цвета, находящейся сзади капилляра. Несмотря на большую инерционность, термометры со вложенной шкалой получили широкое распространение, так как более удобны для применения.

Стеклянные термометры в зависимости от назначения и области использования подразделяются на: образцовые, лабораторные, технические, бытовые, метеорологические, термометры для сельского хозяйства. Лабораторные термометры обеспечивают контроль в интервале температур 0-500 °С, серый разбит на 4 поддиапазона, что позволяет получать погрешность измерений (с учетом введения поправок), не превышающую $\pm 0,01$ °С (0-60 °С), $\pm 0,02$ °С (55-155 °С), $\pm 0,05$ °С (140-300 °С) и $\pm 0,1$ °С (300-500 °С). В качестве технических термометров применяют только термометры со вложенной ой, которые имеют две модификации: прямые и угловые.

Таблица 2.3 - Параметры термометрических веществ для стеклянных термометров

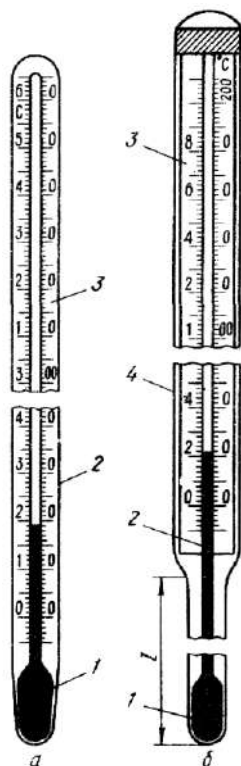
Термометрическая жидкость	Возможные пределы измерения, °С		Средний температурный коэффициент объемного расширения, 1/К	
	нижний	верхний	действительный	видимый
Ртуть	-35	750(1200)	0,00018	0,00016
Керосин	-60	300	0,00095	0,00093
Голуол	-90	200	0,00109	0,00107
Этиловый спирт	-80	70	0,00105	0,00103
Петролейный эфир	-120	25	0,00152	0,00150
Пентан	-200	20	0,00092	0,00090

Имеется значительное количество модификаций термометров в зависимости от предела измерения, длины нижней (от 66 до 1043 мм) и верхней частей (160 или 240 мм). Допускаемая погрешность равна цене деления технического термометра. При постоянной эксплуатации в различных точках металлургических агрегатов термометры устанавливаются в специальных металлических защитных оправах.

Для обеспечения задач позиционного регулирования и сигнализации температуры в лабораторных и промышленных установках разработаны специальные электроконтактные технические термометры двух типов: 1) с постоянными впаянными контактами, обеспечивающие замыкание и размыкание электрических цепей при одной, двух или трех заранее заданных температурах; 2) с одним подвижным контактом (перемещается внутри капилляра с помощью магнита) и вторым неподвижным контактом, впаянным в капилляр, что обеспечивает замыкание и размыкание электрической цепи между контактами при любом значении выбранной шкалы термометра. Перемещающаяся в капилляре ртуть обеспечивает размыкание или замыкание цепи между контактами, к которым подводится напряжение постоянного или переменного тока и нагрузка на которых не должна превышать 0,5 мА при напряжении не более 0,3 В.

По методу градуировки и установки при измерении жидкостные термометры подразделяются на два типа: 1) градуируемые и эксплуатируемые при полном погружении, т.е. при погружении термометра в измеряемую среду до отсчитываемого деления шкалы; 2) градуируемые и эксплуатируемые при заданной глубина погружения, т.е. нижняя часть термометра погружается в измеряемую среду до отметки, указанной на корпусе прибора.

В процессе измерения температур стеклянными жидкостными термометрами появляются погрешности, обусловленные рядом причин. Это ошибки, возникающие вследствие дефектов термометра (возгонка термометрической жидкости, разрывы столбика жидкости, смещение шкальной пластинки и т.п.); ошибки, вносимые наблюдателем; ошибки, возникающие при нормальной эксплуатации (погрешность в нанесении отметок шкалы, нелинейная температурная зависимость изменения объемов термометрической жидкости и стеклянной оболочки) и при отклонении условий эксплуатации от нормальных.



1- резервуар; 2 – капилляр; 3- шкала; 4 – оболочка

а – палочный ; б – технический со вложенной шкалой

Рисунок 2.1 – Жидкостные стеклянные термометры

Несколько подробнее остановимся на последних. Величину их можно уменьшить введением поправок, учитывающих условия измерения. Рассмотрим случай, когда термометр, градуированный при полном погружении, невозможно погрузить в измеряемую среду (или термостат) до отсчитываемого деления шкалы. Таким образом, часть столбика термометрической жидкости выступает над уровнем среды и имеет другую температуру. Среднюю температуру выступающего столбика измеряют с помощью небольшого дополнительного палочного термометра, резервуар которого крепится к корпусу основного измерителя в середине столбика и изолируется асбестовым шнуром.

Для исключения погрешности вводят поправку на выступающий столбик Δt , определяемую по формуле

$$\Delta t = n\beta(t - t_{e.c.}).$$

где n – число градусов на выступающем столбике, $^{\circ}\text{C}$; β – коэффициент видимого расширения термометрической жидкости, в стекле, $1/\text{K}$; t – температура, показываемая термометром, $^{\circ}\text{C}$; $t_{\text{в.с.}}$ – средняя температура выступающего столбика, $^{\circ}\text{C}$.

Пример. Лабораторный стеклянный ртутный термометр, погруженный в измеряемую среду до отметки 120°C , показывает температуру 290°C . Температура выступающего столбика равна 30°C . Коэффициент видимого объемного расширения ртути в стекле $\beta = 0,00016 \text{ } 1/\text{K}$. Поправка на выступающий столбик составит $\Delta t = n\beta(t - t_{\text{в.с.}}) = 170 \cdot 0,00016 (290 - 30) = 7,07 \approx 7,0^{\circ}\text{C}$. Действительное значение измеренной температуры равно $290 + 7 = 297^{\circ}\text{C}$.

При эксплуатации термометра с заданной глубиной погружения может возникнуть ошибка вследствие того, что температура его выступающей части значительно отличается от температуры $t_{\text{в}}$ при его градуировке (обычно равной 20°C). Поправка вычисляется по формуле

$$\Delta t_1 = m\beta(t_{\text{в}} - t_{\text{с}}).$$

где m – число градусов, отсчитываемое по термометру, при нормальной глубине погружения, $^{\circ}\text{C}$; β – коэффициент видимого расширения термометрической жидкости в стекле, $1/\text{K}$.

Проверка жидкостных стеклянных термометров проводится в термостатах с помощью образцовых термометров более высокого класса точности.

Биметаллические и dilatометрические термометры. Твердые тела в различной степени изменяют свои линейные размеры при изменении температуры. Данное свойство положено в основу принципа действия биметаллических и dilatометрических термометров.

Металлы и их сплавы относятся к материалам с высоким температурным коэффициентом линейного расширения. Для латуни он равен $(18,3-23,6) \cdot 10^{-6} \text{ } 1/^{\circ}\text{C}$, для никелевой стали – $20 \cdot 10^{-6} \text{ } 1/^{\circ}\text{C}$. В то же время сплав инвар имеет низкий температурный коэффициент линейного расширения ($0,9 \cdot 10^{-6} \text{ } 1/^{\circ}\text{C}$), так же как и плавленый кварц ($0,55 \cdot 10^{-6} \text{ } 1/^{\circ}\text{C}$).

Схема биметаллического термометра, в котором в качестве термочувствительного элемента используется двухслойная пластинка, состоящая из металлов с существенно различными температурными коэффициентами линейного расширения: латуни 1 и инвара 2. При увеличении температуры Δt свободный конец пластины будет изгибаться в сторону металла с меньшим коэффициентом и по величине этого перемещения ΔS судят о температуре

$$\Delta S = \alpha(l^2 / \delta) \Delta t.$$

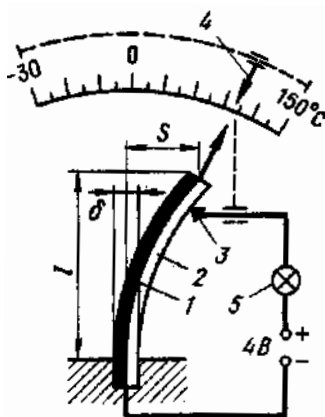
где α – коэффициент удельного изгиба, $1/^{\circ}\text{C}$; l – длина термометра, м; δ – толщина термометра, м.

Большие величины перемещений свободного конца биметаллического термометра имеют устройства, в которых чувствительный элемент выполнен в виде

спирали: плоской винтовой. Угловое перемещение $\Delta\gamma$ свободного конца спирали определяется из формулы

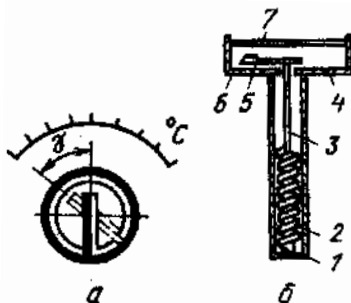
$$\Delta\gamma = \alpha(360/\pi)(l/S) \cdot \Delta t.$$

Схемы, поясняющие принцип действия винтовой спирали и биметаллического термометра. Внутри защитного чехла 1, погруженного в измеряемую среду, расположена винтовая спираль 2, выполненная из двух спаянных между собой металлических полосок, один конец которой неподвижно закрепленного в чехле, а другой (свободный) соединен со штоком 3. Последний обеспечивает, перемещая стрелку 5 относительно шкалы 6 в корпусе 4 с защитным стеклом 7.



1 – латунь; 2 – инвар; 3 – неподвижный контакт; 4 – передвижной указатель задатчика; 5 – сигнальная лампа

Рисунок 2.2 - Схема устройства биметаллического термометра пружинного типа

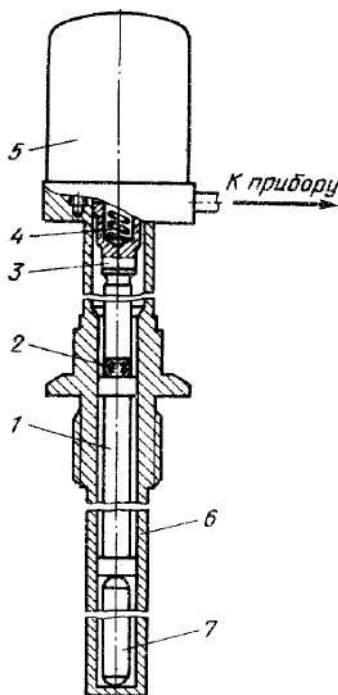


а - схема устройства; б - принцип действия

Рисунок 2.3 - Биметаллический термометр с винтовой спиралью

Данный тип устройств часто используется как термореле в системах сигнализации и автоматического регулирования, а также в качестве температурных компен-

Схема чувствительного элемента дилатометрического датчика температуры.



Внутри корпуса чувствительного элемента трубки 6 расположены трубка 1 и стержень 7, выполненный из материала (инвар, кварц) с небольшим температурным коэффициентом линейного расширения по сравнению с аналогичным коэффициентом корпуса 1 (латунь, коррозионностойкая сталь). Стержень 7 через трубку 1 и толкатель 3 с помощью пружины 4 постоянно поджимается к нижнему концу трубки 6. Шарик 2 исключает появление люфтов между стержнем 3 и компенсационной трубкой 1, которая выполнена из того же материала, что и корпус чувствительного элемента 6, и предназначена для исключения температурной погрешности при установке на объектах с различной толщиной тепловой изоляции.

27

Изменение длины чувствительного элемента Δl , а следовательно, и перемещение стержня при изменении температуры намеряемой среды равно

$$\Delta l = l_K - l_H = \frac{l_H (\alpha_{ч.э.} - \alpha_c) (t_K - t_H)}{1 + (\alpha_{ч.э.} - \alpha_c) t_H},$$

где l_K, l_H – длина чувствительного элемента соответственно при конечной t_K и начальной t_H температурах, м; $\alpha_{ч.э.}, \alpha_c$ – соответственно температурные коэффициенты линейного расширения чувствительного элемента и стержня, $1/^\circ\text{C}$.

Дилатометрические датчики температуры выпускаются с электрическим и пневматическим выходным дилатометрическим сигналом. Диапазон измерений от -60 до 1000 $^\circ\text{C}$, основная допустимая погрешность 1,6-4,0%.

2.3 Манометрические термометры

Принцип действия манометрического термометра основан на использовании зависимости между температурой и давлением термометрического вещества (газа, жидкости), заполняющего герметически замкнутую термосистему данного устройства. Принципиальная схема показывающего манометрического термометра приведена на рисунке. Термосистема состоит из термобаллона 1, капилляра 2 и манометрической одно- или многовитковой пружины 3. Капилляр соединяет термобаллон с неподвижным концом манометрической пружины. Подвижный конец пружины запаян и через шарнирное соединение 4, поводок 5, сектор 6 связан со стрелкой прибора 7.

При погружении термобаллона в среду, температура которой контролируется, изменяется давление термометрического вещества в замкнутой термосистеме, т.е. в системе с постоянным объемом. Чувствительный элемент – манометрическая пружина – деформируется, и ее свободный конец перемещается. Данное изменение положения пружины преобразуется в соответствующее перемещение регистрирующей стрелки относительно шкалы прибора. Поперечное сечение манометрической пружины, выполненной из металлической (сталь, латунь, бронза) изогнутой трубки, либо овальное, либо сложной формы с пережатым средним участком и двумя каналами каплевидной формы (что повышает ее механическую прочность) уменьшает внутренний объем и снижает дополнительную температурную погрешность, связанную с изменением температуры окружающей среды. Биметаллическая пружина 8 служит для уменьшения влияния измерения температуры окружающей среды.

Цилиндрический термобаллон изготавливают из коррозионностойкой стали, обеспечивающей возможность контроля температуры химически агрессивной среды. Для защиты от механических повреждений капилляр, выполненный в виде медной или стальной трубки внутренним диаметром 0,35 и наружным 2,5 мм, помещают в защитную металлическую оболочку. Длина капилляра различна и изменяется в зависимости от вида термометра от 0,6 до 40 м. Манометрические термометры делятся на газовые, конденсационные и жидкостные. В газовых или жидкостных термометрах вся термосистема заполнена тем или иным веществом, в конденсационных термометрах только термобаллон заполнен низкикипящей жидкостью и ее насыщенными парами, а в остальной части термосистемы находятся либо насыщенные

пары данной жидкости, либо специальная жидкость для передачи давления из термобаллона в манометрическую пружину. Отличие приборов конденсационного типа заключается также в значительной нелинейности зависимости давления насыщенного пара от температуры. Поэтому необходимо применение специальных устройств для получения равномерной шкалы термометра. Характер заполнения определяет размеры термобаллона и длину капилляра: они наибольшие у газовых термометров, наименьшие у жидкостных. Значительные габариты термобаллона газовых термометров ограничивают область их применения.

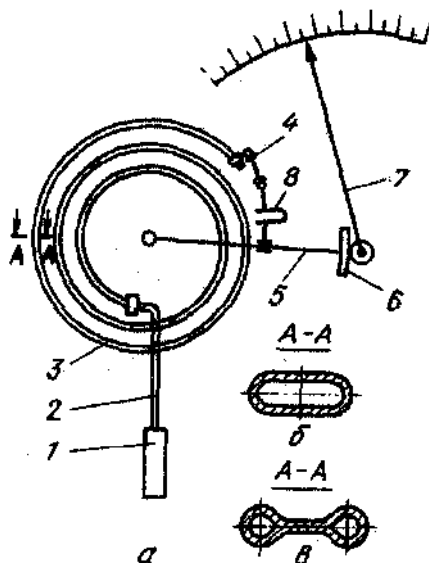


Рисунок 2.5 - Схема показывающего манометрического термометра

На показания манометрических термометров большое влияние оказывают внешние условия: изменение температуры окружающего воздуха (дополнительная температурная погрешность), различная высота расположения термобаллона и пружины (гидростатическая погрешность), колебания атмосферного давления (барометрическая погрешность).

Дополнительная температурная погрешность, появляющаяся из-за изменения упругости манометрической пружины, характерна для газовых и конденсационных термометров: при повышении температуры воздуха упругость пружины понижается, что приводит также к изменению температуры термометрической среды в капилляре и пружине и, следовательно, к изменению давления в термосистеме. Этот источник дополнительной температурной погрешности проявляется в газовых и жидкостных манометрических термометрах. Уменьшить данную погрешность можно с помощью специальных компенсаторов (биметаллическая пружина, инварный сердечник), установкой параллельной термосистемы без термобаллона, а также путем применения манометрической пружины специальной формы.

2.4 Электрические термометры сопротивления

Общие сведения. В металлургической практике для измерения температур до 650 °С применяют термометры сопротивления (ТС), принцип действия которых основан на использовании зависимости электрического сопротивления вещества от температуры. Зная данную зависимость, по изменению величины сопротивления термометра, судят о температуре среды, в которую он погружен. Выходным параметром устройства является электрическая величина, которая может быть измерена с весьма высокой точностью, передана на большие расстояния и непосредственно использована в системах автоматического контроля и регулирования.

В качестве материалов для изготовления чувствительных элементов ТС используются чистые металлы: платина, медь, железо, никель и полупроводники, изменение электросопротивления материала при изменении температуры характеризуется температурным коэффициентом сопротивления α (1/°С), который вычисляется по формуле

$$\alpha = (R_t - R_0) / (R_0 t),$$

где t - температура материала, °С; R_0 и R_t - электросопротивление соответственно при 0 °С и температуре t , Ом.

Чистые металлы имеют практически линейную зависимость электросопротивления от температуры и положительный температурный коэффициент сопротивления, достигающий 0,004 – 0,006 1/°С, т.е. увеличение температуры на 1 °С приводит к повышению сопротивления приблизительно на 0,4-0,6 % от величины в электросопротивления при 0 °С.

Материал чувствительного элемента ТС должен иметь высокое удельное сопротивление, что обеспечивает небольшие габариты термометра; значительный коэффициент, а для получения высокой чувствительности устройства; хорошую воспроизводимость состава; стойкость к агрессивному воздействию окружающей среды при повышенных температурах; стабильность характеристики во времени; хорошие экономические показатели; линейность характеристики.

Наиболее хорошо указанным требованиям отвечают платина [интервал температур (-260)÷(+750 °С)] и медь [интервал (-50)÷(+180 °С)]. Специальная конструкция платинового термометра сопротивления (ТСП) позволяет, повысить верхний предел измерения до 1100°С.

Платина является основным материалом для изготовления ТС. Она характеризуется достаточно высоким удельным сопротивлением ($\rho_0 = 0,0981 \cdot 10^{-6}$ Ом·м), устойчива к окислительной среде, имеет стабильную и хорошо воспроизводимую градуировку от партии к партии. К недостаткам следует отнести высокую стоимость, возможность загрязнения и охрупчивания в восстановительной среде и др.

Однако достоинства платины обеспечивают наиболее точные измерения температур с помощью ТСП (классы точности 1 и 2). К достоинствам меди следует отнести низкую стоимость, линейную зависимость сопротивления от температуры, возможность получения тонкой проволоки высокой степени чистоты и в различной изоляции, недостаток медных термометров сопротивления (ТСМ) заключается в низком верхнем пределе измерения (180 °С), что вызвано значительным окислением

меди при высоких температурах из-за разрушения изоляции (классы точности 2 и 3). Медь имеет малое удельное сопротивление ($\rho_0 = 0,0155 \cdot 10^{-6}$ Ом·м).

В диапазоне температур от -50 до +180 °С сопротивление меди находится в линейной зависимости от температуры

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

где R_0 и R_t - соответственно сопротивления ТСМ при температурах 0°С и t , Ом.

Полупроводниковые термометры сопротивления (ТСПП) или терморезисторы имеют значительно больший температурный коэффициент сопротивления (2-20 %/К) отрицательный у термисторов (2-7 %/К), положительный у термисторов (2-20 %/К). При очень низких температурах полупроводники обычно изоляторы, при высоких зависимость их сопротивления от температуры может быть выражена в виде экспоненциальной функции

$$R_{T_2} = R_{T_1} l^{B \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right)},$$

где T_2 - измеренная температура, К; T_1 - эталонная температура, например, 273,15 К; R_{T_1} и R_{T_2} - значения сопротивления чувствительного элемента ТСПП соответственно при измеренной и эталонной температурах, Ом;

B - постоянный коэффициент, зависящий от материала; $B = 1200 \div 7200$ К.

ТСПП получили достаточно широкое распространение в лабораторной и промышленной практике вследствие высокого температурного коэффициента (высокая чувствительность), простоты изготовления, прочности, небольших габаритов (малая инерционность). Их сопротивление велико (от 1 кОм до 1 МОм), что также повышает точность контроля температуры, так как изменением сопротивления клемм и соединительных проводов можно практически пренебречь.

Термисторы состоят главным образом из смесей оксидов металлов: кобальто-марганцевых, медно-марганцевых, медно-кобальто-марганцевых и др. Пределы контролируемых температур: $(-200) \div (+300)$ °С.

При измерении низких температур вблизи 0 К наиболее часто используются германий и кремний, причем монокристаллический германий, легированный сурьмой, является эталонным ТС и воспроизводит температурную шкалу в диапазоне от 4,2 до 13,81 К.

Термисторы изготавливают из сегнетоэлектрических керамик на основе титанатов, цирконатов свинца, бария, мышьяка и др. Они используются в сравнительно узком интервале температур (от 10 до 200 °С), но диапазон измерения для каждого типа термистора еще уже и составляет только примерно 20 °С, причем в этом интервале сопротивление изменяется на несколько десятков процентов. Использование термисторов в настоящее время ограничивается системами защиты от перегрева (например, электрических двигателей, подшипников и т.п.).

ТСПП имеют также существенные недостатки, которые ограничивают их применение в металлургии: 1) нелинейный характер зависимости сопротивления от

температуры; 2) отсутствие воспроизводимости состава и градуировочной характеристики, что исключает взаимозаменяемость отдельных ТС данного типа. Это приводит к выпуску ТСПП с индивидуальной градуировкой.

При измерении температуры с помощью ТС необходимо учитывать, что чувствительный элемент у металлических ТС имеет большую длину и полученный результат характеризует среднюю температуру измеряемой среды в данном районе. Другим источником методической погрешности является наличие тока, протекающего через чувствительный элемент ТС и вызывающего его нагрев, что может исказить картину теплообмена в месте измерения. При температуре тающего льда величина этой погрешности для ТСП и ТСМ не превышает соответственно 0,2 и 0,4 °С (рассеиваемая мощность ТС < 10 мВт).

Типы и конструкции ТС. Для решения различных задач ТС делят на эталонные (ТСП), образцовые (ТСП) и рабочие, которые в свою очередь подразделяются на лабораторные (ТСП, ТСМ) и технические (ТСП, ТСМ, ТСПП).

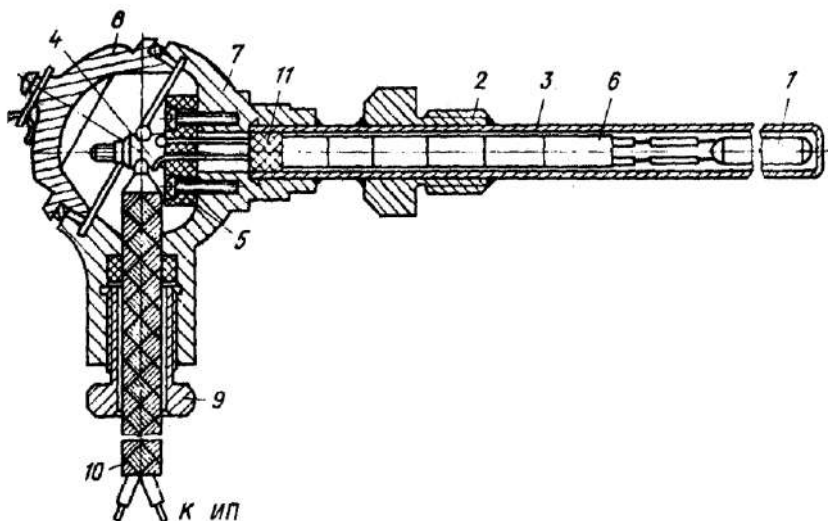
Эталонные ТС предназначены для воспроизведения и передачи шкалы МПШТ в интервале 13,81-903,89 К [(-259,34)÷(+630,74) °С]. Для передачи температурной шкалы измерительным приборам низшего класса точности используются платиновые ТС 1-го и 2-го разрядов. В качестве эталонных, образцовых и лабораторных приборов повышенной точности в СССР используются платиновые ТС конструкции П.Г. Стрелкова.

Технические ТС в зависимости от назначения и конструкции делятся на: погружаемые, поверхностные и комнатные (для помещений); защищенные и не защищенные от действия агрессивной среды; стационарные и переносные; термометры классов точности 1, 2 и 3 и т.д. По тепловой инерции различают три группы: с большой, средней и малой инерционностью. Для последней группы постоянная времени не превышает 9 с.

Приборостроительная промышленность выпускает унифицированные конструкции ТС погружного типа, которые используются для измерения температур жидких и газообразных сред. Конструкция промышленного ТС с неподвижным штуцером, долечивающим его установку в строго заданном положении.

Подвижный штуцер позволяет регулировать глубину погружения термометра при измерении температуры сред с условным давлением $p_v = 0,4$ МПа. При измерении температуры сред с высоким давлением на чехол ТС устанавливается специальная защитная (монтажная) I гильза. Длина монтажной части технических ТС лежит в интервале от 60 до 3150 мм. Материал защитного чехла: латунь, алюминий, сталь (08Х13, 12Х18Н10Т).

Чувствительный элемент ТС выполнен из металлической тонкой проволоки с безындукционной (бифилярной) каркасной или бескаркасной намоткой. В качестве каркаса для платиновых термометров применяют плавленный кварц (эталонные, образцовые и технические) и керамику на основе оксида алюминия (технические). Каркас ТСМ изготавливается из пластмассы или металла.



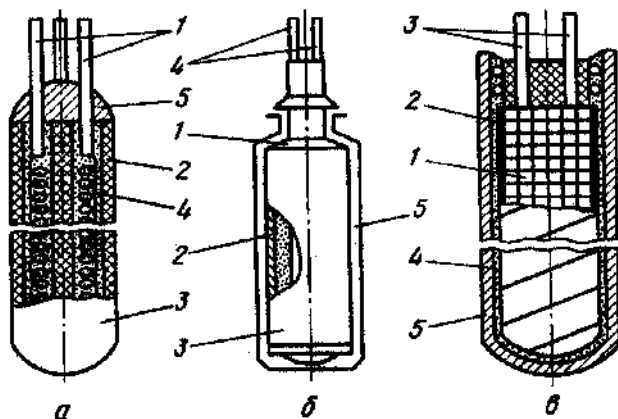
1 - чувствительный элемент; 2 - штуцер с резьбой; 3 – защитный чехол; 4 – соединительные провода; 5 - клеммная колодка; 6 - фарфоровые бусы; 7 – корпус головки; 8 – крышка; 9 - сальниковый ввод; 10 – монтажный кабель; 11 – герметик; 12 – передвижной штуцер

Рисунок 2.6 - Унифицированный термометр сопротивления

Чувствительный элемент, состоящий из: четырех (или двух) последовательно соединенных платиновых спиралей 2, расположенных в каналах керамического каркаса 3. К верхним концам спиралей припаяны выводы 1, выполненные либо из платины, либо из сплава иридия с родием. Пространство между спиральями и каркасом заполнено порошком оксида алюминия 4, крепление спиралей и выводов в каркасе производится глазурью 5. Данный чувствительный элемент имеет ряд достоинств: герметичность, малую степень загрязнения платины глазурью, незначительные механические напряжения, высокую механическую прочность, небольшие габариты (диаметр 4,2 мм, длину 46 и 61 мм).

Чувствительный элемент 1 медного ТС, выполненный на пластмассовом каркасе медной изолированной проволокой 2, Герметизация безындукционной намотки обеспечивается нанесением на поверхность слоя лака 3. Выводы 4 выполнены из меди. Снаружи чувствительный элемент защищен металлическим чехлом.

Чувствительный элемент 1 медного ТС, выполненный бескаркасной намоткой изолированной проволокой, показан на рисунке в. Снаружи он покрыт фторопластовой пленкой 2 и имеет медные выводы 3. Чувствительный элемент помещают в латунную трубку 5, засыпают керамическим порошком 4 и герметизируют. Такая конструкция обеспечивает хорошую виброустойчивость ТС. Диаметр медного чувствительного элемента 5 мм, длина 20,50 или 80 мм.



а - с керамическим каркасом; б - с каркасом из пластмассы; в - бескаркасный

Рисунок 2.7 - Чувствительные элементы металлических термометров сопротивления

Платиновые ТС изготавливаются из проволоки диаметром 0,03-0,1 мм (низкоомные 0,5 мм), медные - 0,05-0,1 мм. Безындукционная намотка обеспечивает возможность включать ТС в схему измерения с приборами, питаемыми как постоянным, так и переменным током.

Метрологические требования, предъявляемые к градуировочным характеристикам металлических ТС, приведены в таблице 2.4.

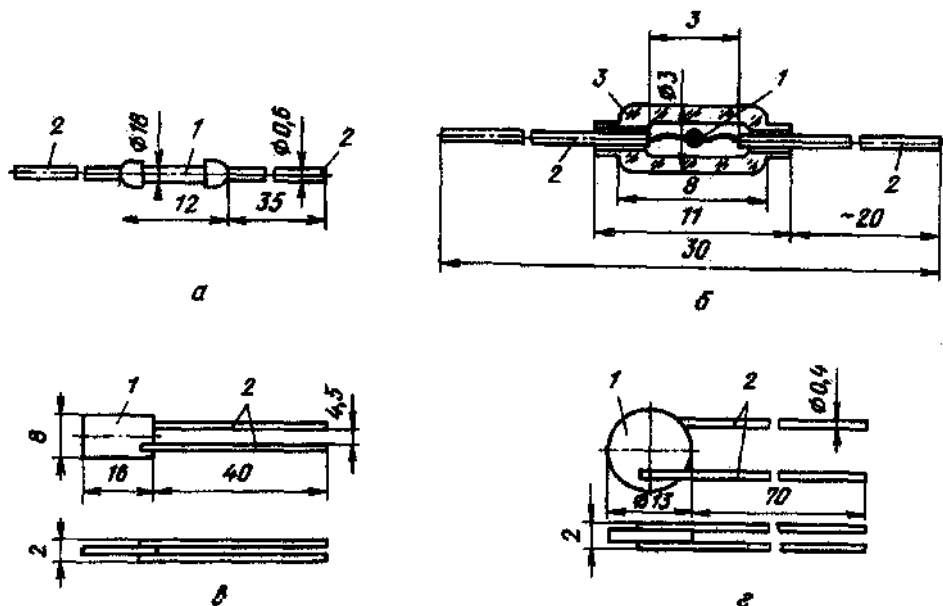
Таблица 2.4 – Требования к градуировочным характеристикам металлических ТС

Тип ТС	Градуировка	Интервал измеряемых температур, °C	Номинальное сопротивление при 0 °C, Ом	Класс точности	Значения отношений R_{100}/R_0 и допускаемые отклонения, Ом	Допустимое отклонение от номинального значения, %
Платиновый ТСП	10 П	-260 ÷ 650	10	I	$1,391 \pm 0,0015$	$\pm 0,05$
	Гр.21	-200 ÷ 650	46		0,0005	
	50 П	-200 ÷ 750	50	II	$1,391 \pm 0,0015$	$\pm 0,1$
					0,0010	
	100 П	-260 ÷ 750	100	III	$1,391 \pm 0,0015$	$\pm 0,2$
					0,0015	
Медный ТСМ	Гр.23	-50 ÷ 180	53	II	$1,428 \pm 0,0010$	$\pm 0,1$
	50M	-50 ÷ 200	500			
	100M	-50 ÷ 200	100	III	$1,428 \pm 0,0020$	$\pm 0,2$

Взаимозаменяемость ТС достигается при помощи стандартных градуировок, в которой оговаривается сопротивление R_0 при 0 °C, отношение R_{100}/R_0 , а также допустимые значения их отклонений при переходе от одного термометра к другому (в пределах данного типа и класса). Металлические ТС используют для измерения температуры воздуха, газообразного и жидкого топлива, кислорода, охлаждающей

воды, пара, низкотемпературных продуктов сгорания в различных металлургических агрегатах.

Значительно реже в металлургической практике встречаются полупроводниковые термометры сопротивления. Их применяют в термореле, низкотемпературных регуляторах, обеспечивающих высокоточную стабилизацию чувствительных элементов газоанализаторов, хроматографов, корпусов пирометров, электродов термоэлектрических установок для экспресс-анализа состава металла и т.п. Чувствительные элементы ТСПП выполняются в виде небольших цилиндриков, шайбочек, пластинок или бусинок.



а - стержневой; б - бусиновый; в - пластинчатый; г - дисковый; 1 - чувствительный элемент; 2 - выводы; 3 - защитное стекло

Рисунок 2.8 - Конструктивное исполнение ТСПП прямого подогрева

Сопротивление поверяемого ТС измеряется компенсационным методом. Термометр сопротивления R_t включен последовательно с образцовой катушкой сопротивления R_k (класс 0,01; 0,02). С помощью батареи Б и регулировочного сопротивления R_r устанавливается ток $I = 5$ мА, проходящий через ТС.

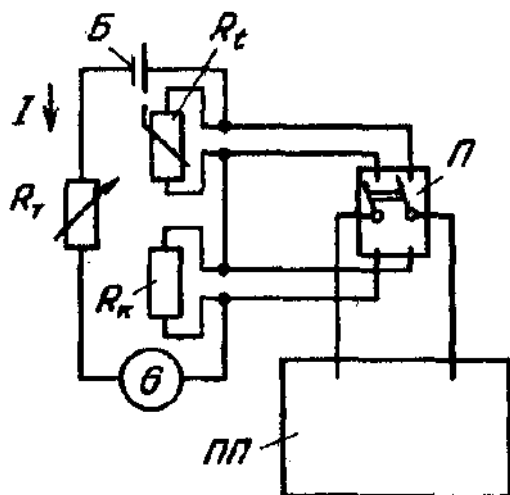


Рисунок 2.9 - Компенсационная схема измерения сопротивления ТС

Падения напряжения на ТС $U_t = I R_t$ на катушке $U_k = I R_k$ с помощью переключателя П последовательно подаются на низкоомный лабораторный потенциометр ПП класса 0,01 или 0,02. Искомую величину сопротивления R_t вычисляют по формуле

$$R_t = (U_t / U_k) R_k.$$

С помощью мегомметра проверяется электрическая изоляция ТС, которая должна выдерживать в течение 1 мин напряжение 500 В переменного тока.

2.5 Мостовые схемы измерения сопротивления термометров

Для измерения сопротивления используют четырехплечие уравновешенные (ручные или автоматические) и неуравновешенные мосты. Уравновешенный мост, используется для определения величины сопротивления при градуировке ТС и при измерениях температуры в лабораторных условиях. Термометр сопротивления R_t вместе с соединительными линиями $2R_l$ образует одно плечо моста, известные сопротивления R_1, R_2, R_3 - остальные, причем последнее является переменным сравнительным плечом. В диагональ ВД включена батарея питания Б, а диагональ АС - гальванометр G, служащий нуль-индикатором.

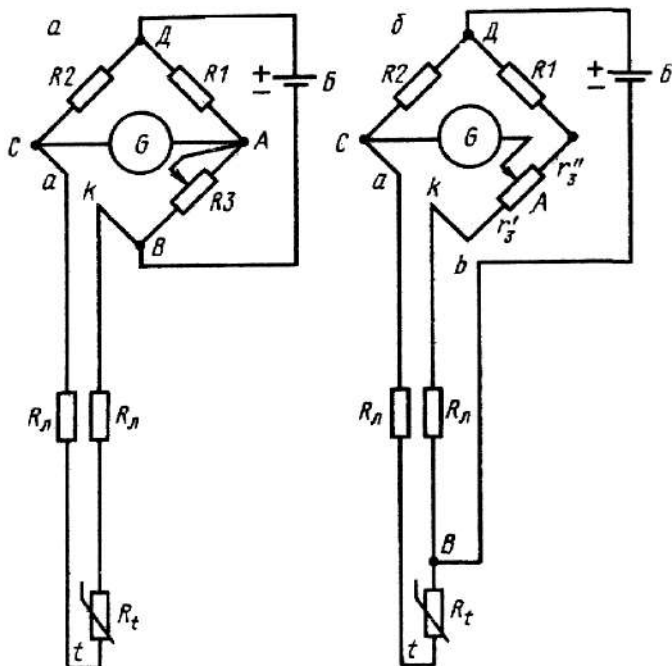


Рисунок 2.10 - Схема уравновешенного моста для измерения сопротивления

Равновесия схемы, т.е. состояния, при котором ток в гальванометре отсутствует, а потенциалы точек А и С равны, добиваются изменением величины R_3 . Этому состоянию соответствует равенство $R_1/R_3 = R_2/(R_1 + 2R_l)$, откуда

$$R_t = (R_2 / R_1) R_3 - 2R_l.$$

Сопротивления R_1 , R_2 и R_l постоянны, поэтому в общем виде уравнение можно записать

$$R_t = f(R_3).$$

Нулевой метод измерения характеризуется высокой точностью, так как исключается влияние окружающей температуры, магнитных полей и изменения напряжения батареи питания Б. Однако значительная погрешность может возникать при изменении сопротивления соединительных проводов R_l , что вызывается значительными сезонными и суточными колебаниями температуры в местах нахождения кабеля, соединяющего ТС и измерительный мост.

Трехпроводная схема включения ТС, в которой одна вершина диагонали питания (В) перенесена непосредственно к термометру. Для равновесия можно записать

$$(R_1 + r_3^{\prime\prime}) / (r_3^{\prime} + R_2) = R_2 / (R_1 + R_2),$$

$$\text{откуда } R_1 = \frac{R_2 \cdot r_3^{\prime}}{R_1 + r_3^{\prime\prime}} + \left(\frac{R_2}{R_1 + r_3^{\prime\prime}} - 1 \right) R_2.$$

Сопротивления проводов $R_{\text{л}}$ оказываются включёнными в различные плечи моста, поэтому изменение их величины $\Delta R_{\text{л}}$ практически взаимно компенсируется (полная компенсация при $R_1 = R_2$).

При втором методе включения ТС погрешность практически на порядок ниже, но в 1,5 раза увеличивается расход соединительных проводов.

Неуравновешенный мост исключает необходимость выполнения ручных операций по изменению величины R_3 . В нем вместо нуля-прибора G в диагональ моста АС устанавливается миллиамперметр. При постоянном напряжении питания и постоянных сопротивлениях R_1, R_2, R_3 через этот прибор будет протекать ток, величина которого зависит (нелинейно) от изменения температуры ограничено. Они в основном применяются для преобразования величины сопротивления термометра в напряжение.

Автоматические уравновешенные мосты широко используются для измерения и регистрации температуры в комплекте с ТС. Их характеризуют высокая точность, возможность использования в системах автоматического регулирования. Они выпускаются различных модификаций: одно- и многоточечные, с дисковой или ленточной диаграммой, с сигнальными устройствами и т.п.

Принципиальная схема автоматического уравновешенного моста, который так же, как рассмотренный выше ручной равновесный мост, реализует нулевой метод измерения сопротивления.

Термометр сопротивления R_t подключен к прибору по трехпроводной схеме. В измерительную схему моста входят уравновешивающий реохорд R_p — с шунтирующим его резистором $R_{\text{ш}}$ (ограничивает ток, текущий по реохорду); резисторы R_n и R_k , определяющие начало и конец шкалы; спирали r_n и r_k , обеспечивающие точную подгонку диапазона шкалы и являющиеся частью резисторов R_n и R_k ; резисторы R_1, R_2 и R_3 , образующие постоянные плечи моста; ТС R_t , являющийся ременным плечом; балластный резистор R_b , который ограничивает в мостовой схеме и обеспечивает минимальный нагрев ТС; подгоночные резисторы $R_{п1}$ и $R_{п2}$, обеспечивающие сопротивление подводящей линии $R_{\text{л}} = 5$ Ом (каждый из двух соединительных проводов имеет сопротивление 2,5 Ом).

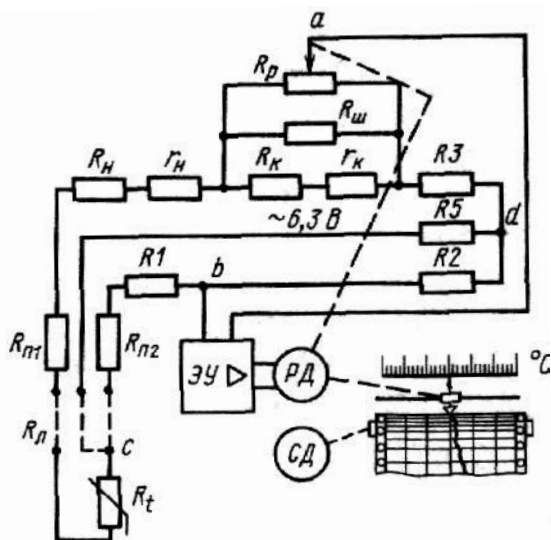


Рисунок 2.11– Принципиальная схема автоматического уравновешенного моста

Электронный усилитель переменного тока ЭУ включен в диагональ ab и обеспечивает усиление разбаланса, возникающего в измерительной схеме при изменении сопротивления ТС R_t . Усиленный сигнал поступает на вход реверсивного двигателя РД, который вращением вала заставляет перемещаться подвижную каретку регистрирующего устройства и движок реохорда R_p . Вращение вала происходит до тех пор, пока не наступит новое равновесие схемы; напряжение разбаланса станет равным 0, сигнал на входе РД также исчезнет, и двигатель остановится.

Питание измерительной системы моста производится через диагональ dc с помощью силового трансформатора ЭУ переменным током напряжением 6,3 В и частотой 50 Гц. Синхронный двигатель СД перемещает диаграммную бумагу относительно пера или печатающего устройства с постоянной скоростью.

Логометры часто используют в комплексе с ТС. Это приборы магнитоэлектрической системы, основанные на сравнении токов в цепях термометра и постоянного сопротивления. Между полюсами постоянного магнита NS расположены под углом $15-20^\circ$ две жестко связанные между собой рамки R_p и R'_p . Они изготовлены из тонкой изолированной медной проволоки и могут поворачиваться в двух криволинейных опорах, перемещаясь в воздушном зазоре между наконечниками магнита и неподвижным сердечником С. Вместе с рамками относительно шкалы движется и стрелка. Зазор между полюсами магнита и сердечником имеет переменную ширину и убывает от центра полюсных наконечников к их краям, что обеспечивает соответствующее возрастание магнитной индукции.

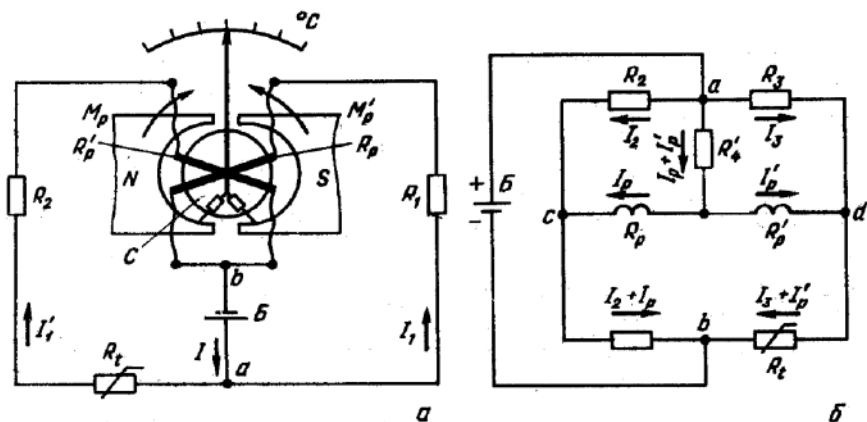
Питание рамок осуществляется от одного источника - батареи Б, причем ток подводится к ним с помощью "безмоментных" вводов (золотые ленточки) или с использованием маломоментных спиральных пружинок, имеющих незначительный собственный противодействующий момент. Из схемы следует, что имеются две це-

пи: цепь рамки R_p , которая включает постоянное сопротивление R_1 , и цепь рамки R'_p , состоящая из постоянного сопротивления R_2 и переменного сопротивления ТС R_t . При протекании через рамки соответствующих токов I_1 и I'_1 создаются магнито-электрические моменты M_1 и M'_1 , направленные навстречу друг другу и равные

$$M_1 = S_1 n_1 B_1 I_1 \text{ и } M'_1 = S'_1 n'_1 B'_1 I'_1,$$

где B_1 и B'_1 - магнитная индукция в местах расположения рамок, Тл; S_1 и S'_1 - площадь активной части рамок, m^2 ; n_1 и n'_1 - число витков рамок.

В том случае, когда $R_1 + R_p = R_2 + R'_2 + R_t$ силы токов, протекающих через рамки, равны ($I_1 = I'_1$), и магнитные моменты, вращающие рамки, будут равны.



а – принципиальная схема устройства; б – электрическая схема

Рисунок 2.12 - Магнитоэлектрический логометр

Пусть температура среды, в которую погружен металлический ТС, возрастет. Это приведет к увеличению сопротивления R_t и, следовательно, к уменьшению тока I_1 и вращающего момента M'_1 . Подвижная система под действием большего момента M_1 начнет поворачиваться по часовой стрелке, что будет приводить к возрастанию M'_1 и уменьшению M_1 , так как рамка R'_p перемещается в область больших значений, а рамка R_p - в область меньших значений магнитной индукции. В определенном положении вращающие моменты вновь станут равными, что при $S_1 n_1 = S'_1 n'_1$ соответствует

$$B_1 I_1 = B'_1 I'_1 \text{ или } I_1 / I'_1 = B'_1 / B_1.$$

Для жестко скрепленных рамок отношение индукций зависит от угла поворота подвижной системы. Следовательно, $I_1 / I'_1 = f(\varphi)$, а

$$\varphi = f_2\left(\frac{I_1}{I_1^*}\right) = f_2\left(\frac{R_p^* + R_2 + R_t}{R_p + R_1}\right),$$

или, учитывая, что R_1 , R_2 , R_p и R_p^* – практически постоянные величины,

$$\varphi = F(R_t).$$

Для повышения чувствительности логометра измерительная схема прибора выполнена по симметричной мостовой схеме. В этом случае сопротивления симметричных плеч моста равны между собой $R_1 = R_3$, $R_2 = R_4$ причем значение R_2 выбирается равным сопротивлению ТС, соответствующему среднему значению градуировочной шкалы. При таком включении с изменением величины R_t происходит одновременное противоположное изменение токов в обеих рамках R_p и R_p^* , что и обеспечивает более высокую чувствительность, чем у приборов, выполненных по несимметричной схеме включения. Промышленность выпускает показывающие, самопишущие (до 12 точек) логометры, переносные и щитового монтажа, которые могут иметь специальные устройства для регулирования и сигнализации. Класс точности приборов 0,2; 0,5; 1,0; 1,5; 2,0; шкала градуируется в градусах Цельсия.

На точность измерения температуры логометром в комплекте с ТС влияет изменение сопротивления соединительных проводов, а также наличие внешних магнитных полей. Отклонение напряжения питания в пределах $\pm 20\%$ от номинального значения (4В) практически не влияет на угол поворота подвижной системы и не вносит погрешностей в измерения.

Проверка автоматических мостов и логометров осуществляется с помощью образцового магазина сопротивлений с наименьшим делением 0,01 Ом, который подключается на вход прибора вместо ТС. Согласно градуировочной характеристике, каждому значению шкалы прибора соответствует определенное сопротивление. Изменяя сопротивление магазина, стрелку прибора точно устанавливают на цифровой отметке шкалы. Разность между стандартным значением и показанием образцового магазина является погрешностью прибора.

При проверке логометра сопротивление каждой из уравнивательных катушек берется равным половине значения сопротивления линии, указанного на шкале. При проверке моста сопротивление каждой линии от магазина сопротивлений до прибора должно быть равно 2,5 Ом.

2.6 Термоэлектрические термометры

Общие положения. Для измерения температуры в металлургии наиболее широкое распространение получили термоэлектрические термометры, работающие в интервале температур от -200 до 2500°C и выше. Данный тип устройств характеризуют высокая точность, и надежность, возможность использования в системах автоматического контроля и регулирования параметра, в значительной мере определяющего ход технологического процесса в металлургических агрегатах.

Сущность термоэлектрического метода заключается в возникновении электродвижущей силы (э.д.с.) в проводнике, концы которого имеют различную темпе-

ратуру. В зависимости от величины перепада температур и природы проводника (состав, физическое состояние) величина э.д.с. колеблется в значительных пределах. Для того, чтобы измерить возникшую э.д.с, ее сравнивают с э.д.с. другого проводника, образующего с первым термоэлектрическую пару АВ, в цепи которой течет ток.

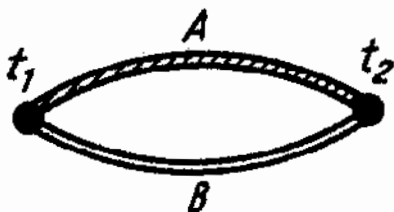


Рисунок 2.13 - Схема термопары

Результирующая термоэлектродвижущая сила (т.э.д.с.) цепи, состоящей из двух разных проводников А и В (однородных по длине) равна

$$E_{AB}(t_2, t_1) = e_{AB}(t_2) + e(t_1)$$

или $E_{AB}(t_2, t_1) = e_{AB}(t_2) - e(t_1).$

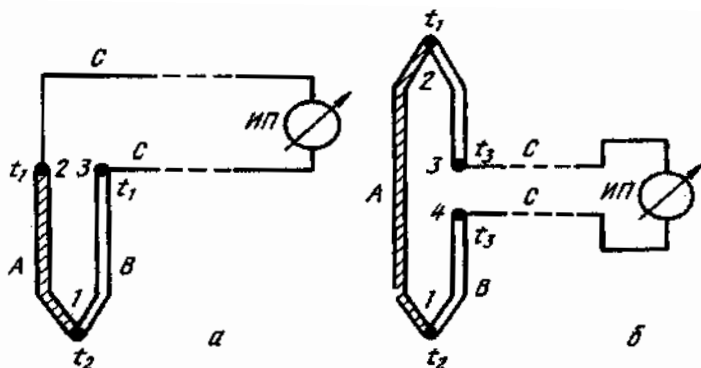
где $e_{AB}(t_2)$ и $e_{AB}(t_1)$ - разности потенциалов проводников А и В соответственно при температурах t_2 и t_1 , мВ.

Т.э.д.с. данной пары зависит только от температур t_1 и t_2 и не зависит от размеров термоэлектродов (длины, диаметра), величин теплопроводности и удельного электросопротивления. При отсутствии перепада температур, т.е. $t_1 = t_2$, т.э.д.с. каждого проводника равна 0 и результирующая т.э.д.с. $E_{AB}(t_2, t_1) = 0$.

По этой причине включение в цепь третьего проводника С, имеющего одинаковую температуру концов, в один из спаев или в разрыв одного термоэлектрода не изменяет т.э.д.с. термопары, так как собственная э.д.с. проводника равна нулю.

Для получения зависимости т.э.д.с. только от одной температуры t_2 необходимо температуру t_1 поддерживать на постоянном уровне, обычно при 0 или 20 °С. Спай, помещаемый в измеряемую среду, называют горячим или рабочим концом термопары; спай, температуру которого поддерживают постоянной, холодным или свободным концом.

Для измерения возникающей т.э.д.с. в контур термопары в холодный спай или в разрыв одного из термоэлектродов с помощью проводов С включают измерительный прибор ИП. В первом случае в схеме три спая: горячий 1 и два холодных 2 и 3, которые должны находиться при постоянной температуре. Во второй схеме включения имеются четыре спая: горячий 1, холодный 2 и нейтральные 3 и 4, причем температура последних t_3 должна быть одинаковой.



а - к свободным концам термопары; б - в разрыв термоэлектродов

Рисунок 2.14 - Схемы включения измерительного прибора в цепь термопары

Необходимо еще раз подчеркнуть, что для правильного включения ИП температуры в обоих местах присоединения третьего, проводника должны быть одинаковыми, что исключает образование дополнительных "паразитных" термопар, т.э.д.с. которых искажала бы сигнал основной термопары.

Для увеличения чувствительности термоэлектрического метода измерения температуры в ряде случаев применяют термобатарею: несколько последовательно включенных термопар, рабочие концы которых находятся при температуре t_2 , а свободные - при известной и постоянной температуре t_1 . При параллельном включении происходит усреднение сигнала т.э.д.с.

Для контроля разности температур двух объектов или различных точек одного объекта используется дифференциальная термопара, у которой одноименные электроды А включены навстречу друг другу, а к другим В подключен ИП. Рабочие спаи имеют разные температуры, а свободные концы - одинаковую.

Требования к материалу термоэлектродов. Термопара может быть получена путем комбинации бесчисленного множества различных материалов: чистых металлов, их сплавов, полупроводниковых и тугоплавких соединений. Однако использование большинства из них в термоэлектрических термометрах широкого применения невозможно в силу того, что они не удовлетворяют ряду требований, предъявляемых к термоэлектродным материалам: высокое значение развиваемой т.э.д.с; стабильность характеристики в течение значительного периода времени и высоких температур; воспроизводимость и линейная зависимость т.э.д.с. от температуры; однородность термоэлектрических свойств по длине проводника; легкость технологической обработки и получения сплава одинакового состава, хорошие экономические показатели (низкая стоимость, недефицитность).

Большое значение развиваемой т.э.д.с. определяет высокое значение чувствительности устройства: отношения $\Delta E / \Delta t$, т.е. отношения приращения т.э.д.с. ΔE к величине изменения температуры Δt , вызвавшее данное приращение сигнала. Данный показатель для технических термоэлектрических термометров находится в пре-

делах 0,01-0,06 мВ/°С. Чем больше это значение, тем менее чувствительный, но более дешевый и надежный вторичный прибор можно использовать в комплекте с термопарой.

Выбор материалов термоэлектродов в значительной степени определяется уровнем температуры и агрессивным воздействием измеряемой среды. Платина и ее сплавы с родием хорошо работают в окислительной и нейтральной средах, вольфрам, молибден, рений и их сплавы - в вакууме, нейтральной и восстановительной средах. Науглероживание проволоки искажает термоэлектрическую характеристику платины и приводит к погрешностям в измерении. Значительный опыт эксплуатации различных термопар привел к тому, что в настоящее время количество применяемых в технике измерения материалов невелико.

Устройство термоэлектрических термометров. Термоэлектрический термометр (ТТ) - это измерительный преобразователь, чувствительный элемент которого (термопара) расположен в специальной защитной арматуре, обеспечивающей защиту термоэлектродов от механических повреждений и воздействия измеряемой среды. Арматура включает защитный чехол 1, гладкий или с неподвижным штуцером 2; и головку 3, внутри которой расположено контактное устройство 4 с зажимами для соединения термоэлектродов 5 с проводами, идущими от измерительного прибора к термометру. Термоэлектроды по всей длине изолированы друг от друга и от защитной арматуры керамическими трубками (бусами) 6.

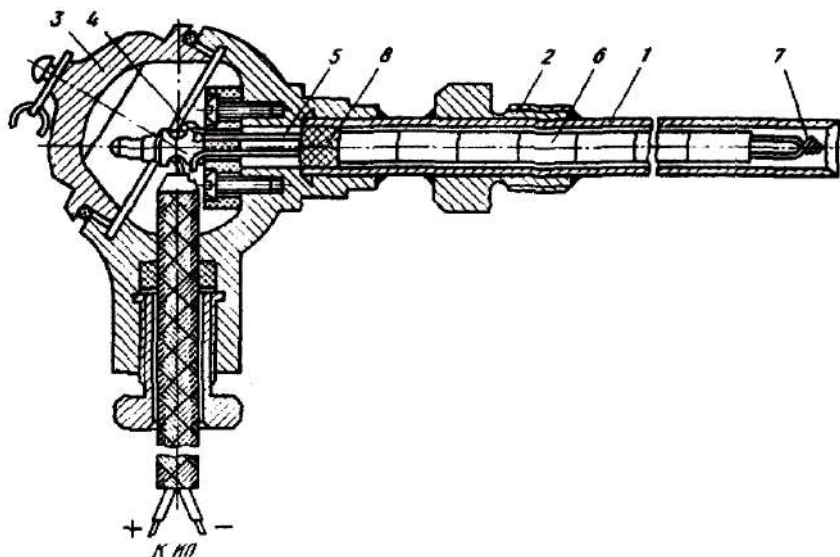


Рисунок 2.15 – Конструкция технического термоэлектрического термометра

Специальная замазка 8 герметизирует внутреннее пространство защитного чехла термометра, который выполняется из газонепроницаемых материалов, выдерживающих высокие температуры и агрессивное воздействие среды. При температурах до 1000 °С применяют металлические чехлы из углеродистой или коррозионно-

стойкой стали, при более высоких температурах - керамические чехлы: фарфоровые, карбофраксовые, алундовые, из диборида и т.п.

В качестве термоэлектродов используется проволока диаметром 0,5 мм (благородные металлы) и до 3 мм (неблагородные металлы). Спай 7 на рабочем конце термопары образуется сваркой, пайкой или скручиванием. Последний способ используется для вольфрам-рениевых и вольфраммолибденовых термопар.

Конструкция технического ТТ предусматривает возможность в процессе эксплуатации извлекать из защитной арматуры термоэлектроды в сборе для проведения поверки или замены. Головка снабжена уплотнением, исключающим попадание пыли и влаги во внутреннюю полость устройства.

Термоэлектрические термометры выпускают двух видов: погружаемые и поверхностные. У последних рабочий спай приводится в непосредственный контакт с измеряемой поверхностью. Приборостроительная промышленность изготавливает устройства различных модификаций, отличающихся: по значению и условиям эксплуатации, по материалу защитного чехла, по способу установки термометра в точке измерения, по герметичности и защищенности от действия измеряемой среды, по устойчивости к механическим воздействиям, по степени тепловой инерционности и т.п.

Конструктивное оформление ТТ весьма разнообразно, что позволяет их применять в различных условиях. Имеется также унифицированная арматура, которая обеспечивает взаимозаменяемость ряда моделей термоэлектрических термометров с термометрами сопротивления. Каждая модель изготавливается с различной длиной погружаемой (монтажной) части ТТ, которая изменяется от 10 до 3150 мм. Длина монтажной части термометров, выпускаемых без защитной арматуры (гибкие ТТ), может достигать 10000 мм.

Перспективной конструкцией гибких ТТ являются кабельные или бронированные оболочковые термопары

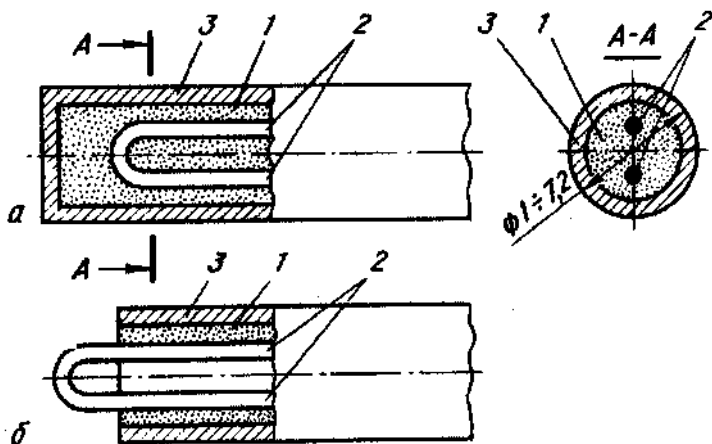


Рисунок 2.16 - Конструкция кабельного термоэлектрического термометра с изолированным (а) и открытым (б) спаем

Методом сухого прессования изготавливают двух- или четырехканальные электроизоляционные бусы 1, в которых размещают хромель-копелевые или хромель-алюмелевые электроды 2 диаметром 0,2-1,2 мм. Изолированная термопара затягивается в металлическую трубку 3 и волочением получают кабельный ТТ. Максимальная длина 100 м, диаметр от 1,0 до 7,2 мм.

Стандартные и нестандартные термоэлектрические термометры. Для измерений в металлургии наиболее широко применяют ТТ со стандартной градуировкой: платинородий-платина (ТПП), платино-родий-платинородий (ТПР), хромель-алюмель (ТХА), хромель-копель (ТХК), вольфрамрений-вольфрамрений (ТВР). В ряде случаев используют также ТТ с нестандартной градуировкой: медь-константан, вольфрам-молибден (ТВМ) и др. В таблице приведены некоторые характеристики, а на рисунке - градуировочные кривые ряда термопар.

Наиболее точным является платинородий-платиновый ТТ, который используется также в качестве рабочих эталонов и образцовых термометров 1-го, 2-го и 3-го разрядов. Однако вследствие высокой стоимости и небольшой величины развиваемой т.э.д.с. ТТ платиновой группы применяются для измерений высоких температур, причем и здесь наблюдается тенденция к их замене термометрами типа ТВР и ТВМ (например, при измерении температуры жидкой стали).

При низких температурах (до 600 °С) наиболее предпочтительным является ТТ типа ТХК. В интервале температур 600-1000 °С обычно применяется ТТ типа ТХА. Они развивают значительную т.э.д.с. (особенно ТХК), дешевы, хорошо противостоят окислению в воздушной среде и являются самыми распространенными.

Вольфрам-рениевый ТТ позволяет измерять температуры до 2000– 2500 °С в вакууме, нейтральной и восстановительной средах. Данный термометр имеет три стандартные характеристики, что позволяет получить неплохие точностные показатели. Без возобновления рабочего спая можно производить до 40 кратковременных погружений в расплав жидкой стали. Изменение градуировочной характеристики при этом не превышает ± 4 °С.

Вольфраммолибденовый термометр ТВМ работает в вакууме, восстановительных и нейтральных средах и применяется для измерения температуры расплавленной стали в печах и ковшах. Недостатками являются небольшая т.э.д.с, нестандартность характеристики от партии к партии, а также наличие инверсии градуировочной кривой. Вольфраммолибденовый термометр развивает значительную т.э.д.с. (одного знака), градуировочная характеристика его практически линейна; позволяет производить длительные измерения в вакууме (на воздухе только кратковременное применение), но рабочий спай - выдерживает без разрушений только 3-4 погружения в высокотемпературный расплав; градуировочная характеристика также нестандартна. В ряде случаев, особенно при высокотемпературных исследованиях, используются термоэлектрические термометры из тугоплавких, соединений, таких как борид циркония, карбид титана, графит, дисилицид вольфрама и т.п.

В условиях длительной эксплуатации при высоких температурах и агрессивном воздействии сред возникает нестабильность градуировочной характеристики, которая является следствием ряда причин: загрязнения материалов термоэлектродов примесями защитных чехлов, керамических изоляторов и атмосферы печи; испарения одного из компонентов сплава; взаимной диффузии через спай. Величина отклонения может быть значительной и резко увеличивается с ростом температуры и

длительности эксплуатации. Указанное обстоятельство необходимо учитывать при оценке точности измерения температуры в производственных условиях.

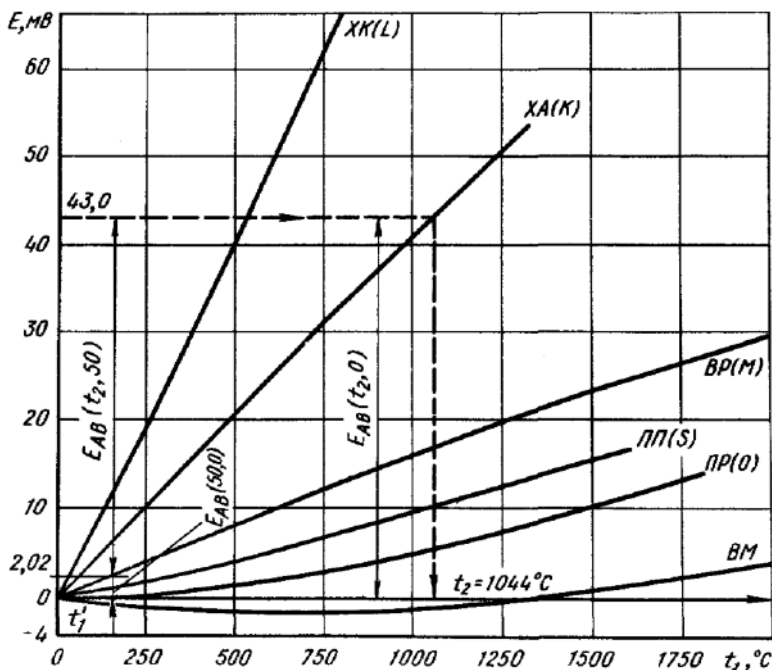


Рисунок 2.17 – Градуировочные характеристики термпар

Поправка на температуру свободных концов ТТ. Т.э.д.с, развиваемая данным ТТ, зависит от перепада температур между рабочим спаем и свободными концами, которые в технических термометрах отстоят друг от друга на расстоянии не более 2-3 м. Таким образом, температура свободных концов, расположенных в головке ТТ, может изменяться в пределах 10-80 °С вследствие суточных и сезонных колебаний температуры окружающей среды, а также тепловых процессов, проходящих в металлургических агрегатах.

Повышение температуры свободных концов ТТ приводит к уменьшению перепада температур, снижению т.э.д.с. термопары и появлению погрешности измерения, которую исключают введением соответствующей поправки. Пусть при неизменной температуре рабочего спая t_2 температура свободных концов t_1 (принимаемая для стандартных градуировок 0 °С) увеличилась и стала равной t'_1 . Определим разность между двумя значениями т.э.д.с, соответствующими двум перепадам температур: $E_{AB}(t_2, t_1) - E_{AB}(t_2, t'_1) = e_{AB}(t_2) - e_{AB}(t_1) - e_{AB}(t_2) + e_{AB}(t'_1)$. Затем после сокращения $e_{AB}(t_2)$ получим: $E_{AB}(t_2, t_1) - E_{AB}(t_2, t'_1) = e_{AB}(t'_1) - e_{AB}(t_1) = E_{AB}(t'_1, t_1)$. Преобразовав данное выражение, получим уравнение

$$E_{AB}(t_2, t_1) = E_{AB}(t_2, t'_1) + E_{AB}(t'_1, t_1).$$

из которого следует, что увеличение температуры свободных концов уменьшает сигнал термопары на величину т.э.д.с, развиваемую аналогичной термопарой, имеющей температуры рабочего спая и свободных концов, соответственно, t'_1 и t_1 . Если $t'_1 < t_1$ то поправка $E_{AB}(t'_1, t_1)$ имеет отрицательный знак.

Пример. Термоэлектрический термометр ТХА измеряет температуру в печи t_2 , в комплекте с потенциометром. При градуировке ТХА температура свободных концов принималась $t_1 = 0^\circ\text{C}$, в условиях измерения она составила $t'_1 = 50^\circ\text{C}$. Сигнал, измеренный потенциометром, $E_{AB}(t_2, 50) = 40,98$ мВ, что соответствует температуре 993°C . Величина поправки может быть определена либо по градуировочной кривой, либо по таблице: $E_{AB}(50; 0) = 2,02$ мВ. На основании уравнения запишем: $E_{AB}(t_2; 0) = E_{AB}(t_2; 50) + E_{AB}(50; 0) = 40,98 + 2,02 = 43,00$ мВ, что соответствует температуре рабочего спая $t_2 = 1044^\circ\text{C}$.

Для исключения влияния изменения температуры свободных концов ТТ в технике измерения пользуются двумя способами: 1) эвакуацией свободных концов из зоны непосредственного измерения с помощью компенсационных проводов; 2) стабилизацией температуры свободных концов с помощью термостатов.

Наибольшее распространение получил первый способ как более надежный и экономичный. Термостатировать головку термометра очень трудно из-за изменяющихся условий теплообмена с окружающей средой. Поэтому свободные концы термопары стремятся удалить как можно дальше от агрегата в такое место, где можно установить термостат. Однако для благородных термопар удлинение термоэлектродов невозможно, так как это приведет к значительному перерасходу платины. Необходимо отметить, что провода, выводимые из головки ТТ, работают при температурах, не превышающих $80-90^\circ\text{C}$. Следовательно, соединительные провода для исключения паразитных т.э.д.с. должны иметь в интервале температур от 0 до 100°C такие же термоэлектрические характеристики, как и термопара ТТ, что позволяет перенести свободные концы термометра непосредственно к измерительному прибору.

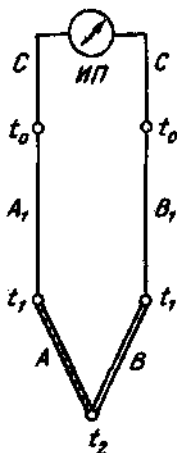


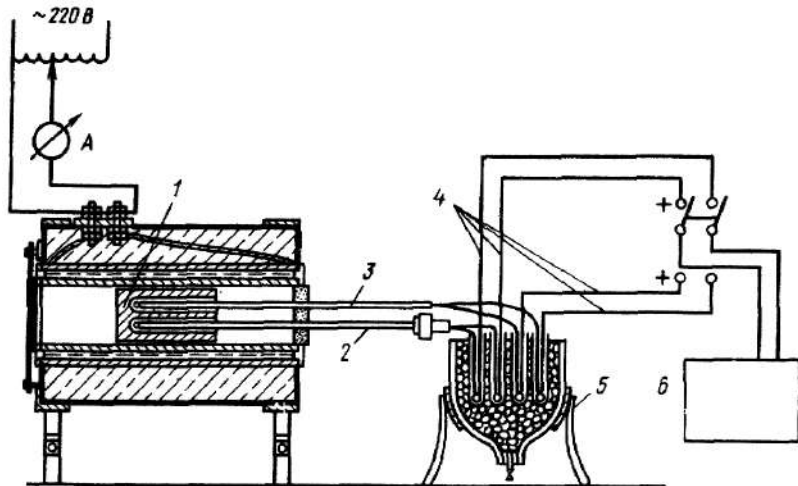
Рисунок 2.18 - Принципиальная схема соединений комплекта для измерения температуры с помощью термопары

Принципиальная схема комплекта для измерения температуры, включающего: термопару с электродами А и В, удлинительные (компенсационные) провода А₁ и В₁, медные провода С и измерительный прибор ИП. Температура рабочего спая t₂, температура места соединения термоэлектродов термопары с компенсационными проводами t₁, а t₀ - температура мест соединения компенсационных проводов с медными. Т.э.д.с. рассматриваемой цепи

$$E = E_{AB}(t_2, t_0) - E_{AB}(t_1, t_0) + E_{A_1B_1}(t_1, t_0).$$

т.е., если термоэлектрические характеристики термопары АВ и компенсационных проводов А₁В₁ одинаковы, то изменение температуры t₁ не приведет к погрешностям в измерении. Действительно при увеличении t₁ т.э.д.с. термопары уменьшится, но точно на такую же величину возрастет т.э.д.с. развиваемая компенсационными проводами.

Для технических ТТ выпускаются различные удлиняющие провода. В лабораториях температура свободных концов поддерживается равной 0 °С с помощью сосуда Дьюара, заполненного тающим льдом. В промышленных условиях необходимо либо обеспечить постоянный уровень температуры (в этом случае в результат измерения вводится определенная поправка), либо непрерывно автоматически корректировать показания прибора при отклонении температуры свободных концов от градуировочной t₁ = 0 °С. Данная операция производится с помощью коробки для свободных концов КТ.



1- металлический блок; 2 - образцовый ТТ; 3 - поверяемый ТТ; 4 - медные соединительные провода; 5 - термостат; 6 - образцовый потенциометр

Рисунок 2.19 – Установка для градуировки технических термометров методом сличения

2.6 Милливольтметры

Т.э.д.с, развиваемую термоэлектрическим термометром, измеряют двумя методами: прямым и компенсационным, первый реализуют милливольтметры, а второй - потенциометры.

Общие положения. Принцип работы милливольтметра заключается в использовании взаимодействия магнитного поля неподвижного магнита и постоянного тока, протекающего через обмотку подвижной рамки. Рамка R_p , включается в цепь ТТ с помощью компенсационных A_1B_1 и медных C проводов. Сила тока, протекающего в цепи, зависит от величины т.э.д.с. $E_{AB}(t_2, t_0)$ и сопротивления измерительной цепи

$$I = E_{AB}(t_2, t_0) / (R_T + R_{BH}),$$

где R_T - сопротивление милливольтметра, складывающееся из сопротивления рамки R_p , добавочного сопротивления R_d , шунта $R_{ш}$ и терморезистора R_t , Ом; R_{BH} - сопротивление внешней цепи, складывающееся из сопротивления термопары R_T , сопротивления компенсационных $R_{КП}$ и соединительных R_C проводов, сопротивления подгоночной катушки $R_{п.к}$, Ом.

При протекании тока через рамку, окруженную полем постоянного магнита, возникает магнитоэлектрический момент M (Н·м), поворачивающий рамку и равный

$$M = 2rlnBI,$$

где $2r$ - ширина рамки, м; l - длина рамки, м; n - число витков обмотки рамки; B - магнитная индукция в воздушном зазоре, Тл; I - сила тока, протекающего в рамке, А.

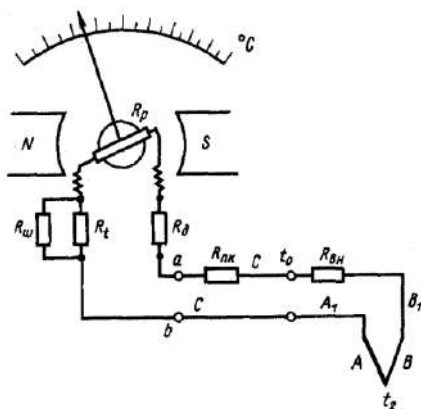


Рисунок 2.20 - Электрическая схема включения магнитоэлектрического милливольтметра в цепь термоэлектрического термометра

При перемещении рамка одновременно закручивает спиральные пружины, которые создают противодействующий упругий момент $M_{п}$ (Н·м)

$$M_{II}=W\varphi,$$

где W - удельный противодействующий момент (момент пружин, отнесенный к единице угла поворота рамки), $H \cdot \text{м/рад}$; φ - угол поворота рамки, рад.

Величина удельного противодействующего момента определяется материалом и размерами пружинок, или других видов подвески, например растяжек.

Вращение рамки будет продолжаться до тех пор, пока магнитоэлектрический момент не уравнивается противодействующим упругим моментом $M = M_{II}$ и $\varphi = 2\pi n l B I / W$.

Принимая, что g, I, n, B, W для данной конструкции прибора при нормальных условиях эксплуатации являются постоянными величинами, получим

$$\varphi = C_0 I,$$

где $C_0 = 2\pi n l B / W$ - чувствительность измерительного механизма к току, рад/А.

Следовательно, чем больше ток, тем больше угол поворота рамки.

$$\varphi = C_0 E_{AB}(t_2, t_0) / (R_r + R_{BH}).$$

В общем виде угол поворота φ зависит от ряда параметров (для данного типа ТТ)

$$\varphi = f(t_2, t_0, R_r, R_{BH}).$$

Для получения однозначной зависимости угла поворота рамки, а следовательно, и положения стрелки относительно оцифрованной шкалы прибора необходимо градуировать милливольтметр при заданных величинах $t_0 = 0^\circ \text{C}$ и $R_{BH} = 5; 15; 25 \text{ Ом}$. Подгоночная катушка $R_{п-к}$ предназначена для того, чтобы в реальных условиях эксплуатации (изменяющиеся и заранее неизвестные значения сопротивлений $R_r, R_{КП}, R_C$) довести общую величину R_{BH} , до значения, при котором был градуирован прибор.

На точность показаний милливольтметра может оказывать влияние отклонение температуры окружающего воздуха от нормальной ($20 \pm 5^\circ \text{C}$), так как это приводит к изменению сопротивления медной обмотки рамки (до 0,4 % на 1°C). Для снижения указанной погрешности последовательно с рамкой включается значительное дополнительное манганиновое сопротивление $R_{ш}$ и терморезистор R_t имеющий отрицательный температурный коэффициент сопротивления, которые образуют термокомпенсатор.

Напряжение на зажимах милливольтметра $U_{ab} = I R_t$.

Подставим в данное выражение значение тока: $U_{ab} = E_{AB}(t_2, t_0) R_r / (R_r + R_{BH})$. После преобразования получим

$$U_{ab}=E_{AB}(t_2,t_0)-U_{ab}R_{ВН}/R_r=E_{AB}(t_2,t_0)-IR_{ВН}.$$

Следовательно, измеряемый милливольтметром сигнал отличается от т.э.д.с., развиваемой термопарой, на величину падения напряжения во внешней цепи, которое тем меньше, чем больше внутреннее сопротивление прибора. Это обстоятельство и определяет стремление увеличить данную характеристику измерительной системы.

Типа милливольтметров. Промышленность выпускает показывающие, самопишущие и регулирующие милливольтметры, имеющие класс точности 1,0; 1,5; 2,0 и 2,5. Шкала градуируется либо в градусах Цельсия, либо в милливольтах. На циферблате указывается тип градуировки ТТ, класс точности, значения внутреннего и внешнего сопротивлений милливольтметра. Приборы выпускаются для измерения температуры в одной или нескольких точках (до 12). Они могут иметь встроенное двух- или трехпозиционное регулирующее устройство, а в ряде случаев и аварийную сигнализацию превышения температуры по одному каналу.

Существуют различные конструктивные оформления измерительной части милливольтметра. Рамки выполняются как с вертикальной, так и горизонтальной осью вращения. Система подвески рамки на растяжках имеет высокую механическую прочность и исключает ошибки измерения, связанные с износом керновых подпятников. Расположение магнита внутри рамки обеспечивает получение неоднородного магнитного поля. Такие приборы имеют преимущества перед милливольтметрами с внешним магнитным полем (меньше собственное поле рассеяния, а также влияние внешних магнитных полей). Данный механизм может быть использован в логометрах, работающих в комплекте с термометрами сопротивления.

Погрешности измерения т.э.д.с. милливольтметром. Измерительный комплект, включающий ТТ и милливольтметр, характеризуется наличием не только основных погрешностей (класс точности прибора, отклонение градуировки ТТ от стандартной), но и возникновением в процессе эксплуатации дополнительных погрешностей.

Они являются следствием ряда причин: 1) изменения сопротивления внешней цепи $R_{ВН}$ в зависимости от непостоянной температуры в цехах и на поверхностях металлургического оборудования, вдоль которых прокладываются соединительные провода; 2) изменения Сопротивления прибора R_r , вследствие значительного изменения температуры помещения, в котором установлен прибор; 3) изменения температуры t_0 свободных концов ТТ; 4) изменения механических характеристик измерительного механизма (упругих характеристик пружин, моментов трения в керновых подпятниках и т.п.); 5) наличия . внешних магнитных полей.

Выше были изложены методы снижения влияния некоторых из них на точность измерения.

Снижения влияния сопротивления внешней цепи добиваются увеличением диаметра соединительных проводов, а также повышением доли сопротивления подгоночной катушки $R_{п.к}$ (выполняется из манганиновой проволоки) в $R_{ВН}$.

Для исключения влияния отклонения температуры t_0 свободных концов от градуировочной вместо термостатов широко применяются коробки КТ для автоматической компенсации изменения т.э.д.с.

Схема включения устройства КТ в измерительную цепь, состоящую из милливольтметра М и термометра АВ.

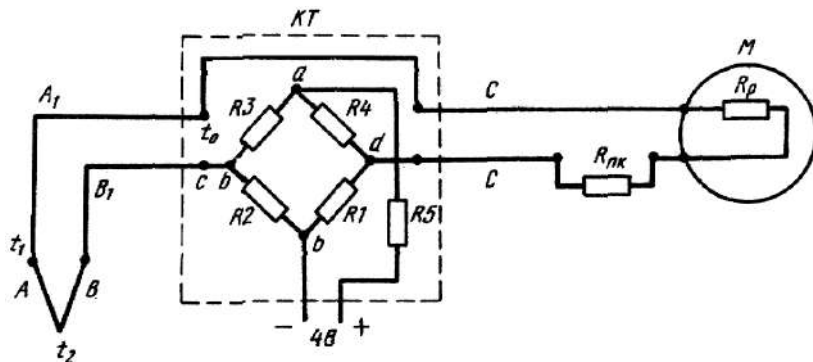


Рисунок 2.21 - Принципиальная схема измерения т.э.д.с. с коробкой КТ для автоматической компенсации температуры свободных концов ТТ

Компенсационные A_1B_1 и соединительные C провода присоединены к клеммам КТ. Таким образом, сопротивления R_1, R_2, R_3, R_4 , образующие равноплечий мост, имеют такую же температуру t_0 , которую имеют свободные концы. Сопротивления R_1, R_2 и R_4 выполнены из манганина, R_3 - из меди. К вершинам диагонали ab подается постоянное напряжение, например от источника стабилизированного питания.

Сопротивления подобраны таким образом, что при $t_0 = 0^\circ\text{C}$ напряжение на вершинах c и d равно нулю, т.е. на милливольтметр поступает сигнал ТТ, соответствующий стандартной градуировке. При увеличении температуры $t_0 (t'_0 > t_0)$ возрастает сопротивление R_3 , что приводит к нарушению равновесия моста и появлению в точках c и d напряжения, компенсирующего уменьшение т.э.д.с. термометра, $E_{AB}(t'_0, t_0) = U_{CD}$. Точность, с которой устройство КТ воспроизводит соответствующую термоэлектрическую характеристику при изменении температуры свободных концов до $t'_0 = 50^\circ\text{C}$, составляет для ТТ типа ТПП, ТХА, ТХК $\pm 3^\circ\text{C}$.

Проверка милливольтметров. Проверка приборов заключается в определении соответствия градуировочной характеристики и класса точности присвоенным значениям. Она проводится сравнением данных величин с показаниями лабораторных приборов, имеющих более высокий класс точности. На вход обоих приборов с помощью источника регулируемого напряжения (ИРН) одновременно подается одинаковый сигнал. Результаты измерений (мВ) сравниваются при прямом и обратном ходах и определяются погрешности поверяемого милливольтметра.

2.7 Компенсационный метод измерения т.э.д.с.

Компенсационный метод, основанный на уравнивании неизвестного сигнала ТТ известным напряжением, позволяет измерить т.э.д.с. более точно, так как в момент измерения ток в цепи термоэлектрического термометра равен нулю. Поэтому исключается погрешность, связанная с влиянием температуры окружающей среды на сопротивление внешней цепи. Приборы, использующие данный принцип, получили название потенциометров и делятся на две группы: неавтоматические (переносные и лабораторные) и автоматические.

Неавтоматические потенциометры. В переносных и лабораторных Потенциометрах компенсация сигнала т.э.д.с. производится оператором вручную. Данные устройства нашли широкое распространение и обеспечивают более высокую точность измерения, чем автоматические.

Принципиальная схема потенциометра, который состоит из трех контуров: измерительного I, нормального элемента II и термопары III. Схема включает: источник питания Б, нормальный элемент НЭ, нуль-прибор НП (миллиамперметр с нулем посередине шкалы), переключатель П, одно постоянное $R_{НЭ}$ и два переменных сопротивления: батареи R_6 и реохорда R_p . Цель НЭ состоит в стандартизации величины компенсирующего (рабочего тока) I_p батареи Б. Необходимое изменение данной величины производится с помощью сопротивления R_6 . Переключатель П обеспечивает включение НП либо в контур нормального элемента, либо в контур термопары.

Стандартизация значения рабочего тока производится с помощью сопротивления R_6 после перевода выключателя П в положение К (контроль). Если падение напряжения U_{ab} на участке ab ($R_{НЭ}$) не равно напряжению $E_{НЭ}$, развиваемому нормальным элементом, то в контуре II появится ток и стрелка НП отклонится от нулевого положения.

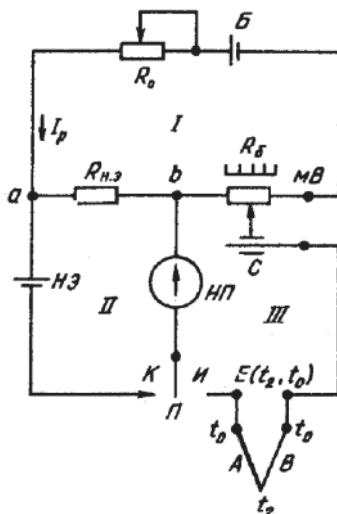


Рисунок 2.22 - Принципиальная схема неавтоматического потенциометра

В этом случае перемещением движка сопротивления R_b добиваются такого изменения тока, чтобы выполнялось равенство $E_{НЭ} = U_{ab}$. При этом ток в цепи нормального элемента станет равным нулю.

Так как $U_{ab} = I_p R_{НЭ}$, то на основании предыдущего равенства

$$I_p = E_{НЭ} / R_{НЭ} = \text{const.}$$

После достижения стандартизации рабочего тока I_p переключатель П переводят в положение И (измерение), при этом НП включается в контур термопары. Если т.э.д.с. $E(t_2, t_0) \neq U_{bc}$ (падению напряжения на участке bc), то, перемещая движок реохорда R_p , обеспечивают возвращение стрелки НП к нулевому значению. При этом наступает полная компенсация неизвестного значения т.э.д.с. известным потенциалом $U_{bc} = I_p n R_p$, где n - относительная величина участка bc реохорда.

Можно записать $E(t_2, t_0) = U_{bc} = I_p n R_p$, и получим

$$E(t_2, t_0) = (E_{НЭ} / R_{НЭ}) n R_p = k n R_p,$$

где $k = \text{const.}$

На основании изложенного можно сделать вывод о том, что величина т.э.д.с. прямо пропорциональна сопротивлению участка bc реохорда R_p , что позволяет отградуировать шкалу, относительно которой перемещается движок С, в единицах напряжения (мВ).

Однако данная линейная зависимость выполняется лишь при условии соблюдения постоянства сопротивления измерительного контура 1 и величины рабочего тока I . Первое условие обеспечивается изготовлением резисторов из манганиновой проволоки, а второе периодической установкой величины тока, что вызвано изменением напряжения батареи питания.

Высокая точность измерения достигается за счет использования для стандартизации рабочего тока специальных нормальных элементов, которые характеризуются весьма высокой стабильностью, развиваемой э.д.с. Так, для НЭ класса точности 0,02 ($E_{НЭ} = 1018,90 \pm 0,04$ мВ) допускаемое изменение э.д.с. за год составляет 0,20 мВ. Следовательно, после пяти лет работы изменение характеристики составит не более 1 мВ (0,1 %).

В потенциометрах применяются НЭ насыщенного и ненасыщенного типа, которые являются обратимыми гальваническими элементами. Они состоят из двух полуэлементов, образованных гальваническими цепями химически чистых веществ. В стеклянную оболочку внизу каждого полуэлемента впаяны токосъемные электроды. В качестве электролита в них используется раствор сульфата кадмия: насыщенный и ненасыщенный. НЭ выпускают четырех классов точности, причем насыщенные имеют более высокие метрологические характеристики. Необходимо отметить, что НЭ могут работать под нагрузкой лишь кратковременно.

Основные преимущества компенсационного метода измерения т.э.д.с.: 1) отсутствие тока в цепи термометра в момент измерения; 2) исключение операции измерения величины тока - НП является лишь индикатором его отсутствия.

Неавтоматические потенциометры изготавливаются различного класса точности - от 0,2 до 0,0005. Для проведения измерений в цеховых условиях обычно используют переносные потенциометры классов точности 0,02; 0,05; 0,1 и 0,2.

Автоматические потенциометры. Автоматические потенциометры исключают участие человека в проведении операций компенсации входного сигнала и поэтому нашли широкое распространение для измерения, регистрации, сигнализации и автоматического регулирования температуры в металлургических агрегатах.

Упрощенная схема устройства автоматического потенциометра. Сигнал ТТ ($E(t_2, t_0)$) сравнивается с компенсирующим напряжением U_K , снимаемым с диагонали неуравновешенного измерительного моста ИМ (Б - источник питания). Мостовая измерительная схема является более совершенной и позволяет непрерывно вводить коррекцию на изменяющуюся температуру свободных концов термоэлектрического термометра.

Если $E(t_2, t_0) \neq U_K$, то на вход вибропреобразователя ВП подается сигнал дисбаланса ΔU .

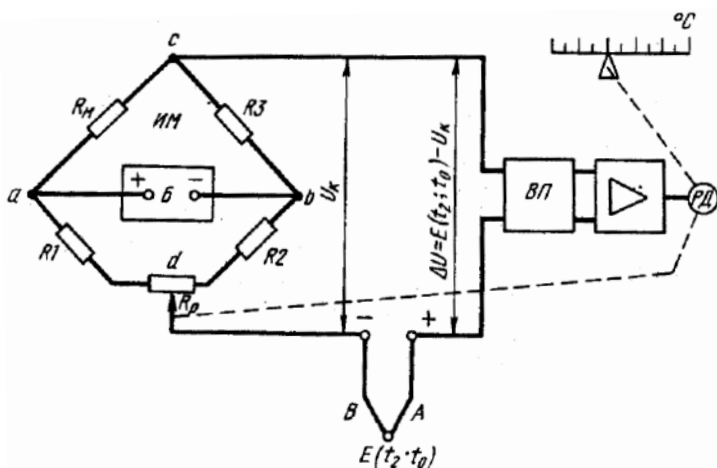


Рисунок 2.23 - Упрощенная принципиальная схема автоматического потенциометра

Происходит преобразование напряжения постоянного тока в электрический сигнал переменного тока, который затем усиливается в усилителе и подается на реверсивный двигатель РД. Последний одновременно перемещает движок реохорда R_p и стрелку относительно шкалы прибора. Изменение положения движка R_p приводит к такому изменению U_K , которое влечет за собой уравнивание измеряемой т.э.д.с. компенсирующим напряжением. При этом $\Delta U = 0$ и двигатель остановится. Таким образом, любые изменения т.э.д.с. приводят к перемещению РД, т.е. прибор непрерывно автоматически компенсирует измеряемый сигнал известным напряжением.

Автоматические потенциометры выпускаются различных модификаций: показывающие, самопишущие (ленточная или круглая диаграмма); одно- и многоточечные (2, 3, 6, 12 каналов); миниатюрные, малогабаритные, нормальных размеров;

регулирующие, с выходными устройствами дистанционной передачи показаний; с различным временем пробега стрелкой всей шкалы. Класс точности серийных автоматических приборов 0,25; 0,5 и 1,0. Градуировка шкалы выполняется либо в градусах Цельсия с одновременным указанием типа градуировки ТТ или пирометра, либо в милливольтах. Рассмотрим принципиальную типовую схему одноточечного потенциометра. Измерительный мост включает: R_p - реохорд; $R_{ш}$ - шунт, предназначенный для подгонки сопротивления реохорда; $(R_n + r_n)$ - сопротивления, определяющие нижний предел шкалы; $(R_n + r_n)$ - сопротивления, определяющие диапазон измерения; R_6 - балластное сопротивление, обеспечивающее получение рабочего тока $I_1 = 3$ мА; R_k - контрольное сопротивление (509,5 Ом), служащее для контроля величины рабочего тока $I_2 = 2$ мА при градуировке или поверке прибора; R_m - медное сопротивление для компенсации изменения температуры свободных концов ТТ.

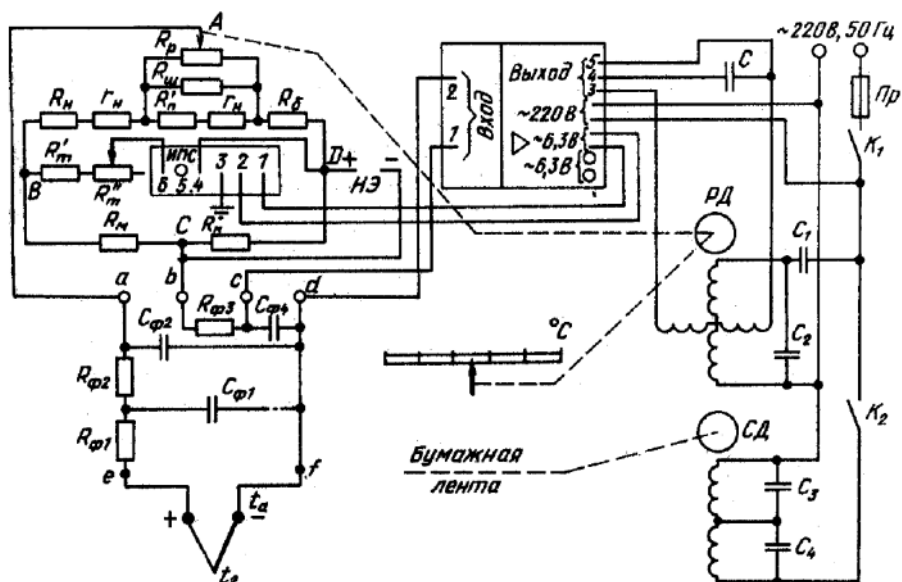


Рисунок 2.24 - Принципиальная схема одноточечного автоматического самопишущего потенциометра

Питание моста производится с помощью источника стабилизированного напряжения ИСП, развивающего ток 5 мА при напряжении 5 В. Сопротивления R'_m и R''_m обеспечивают получение рабочего тока стандартных параметров. Для периодической (через 2500 ч работы) поверки предназначены контакты НЭ, к которым подключается образцовый потенциометр, либо насыщенный нормальный элемент и нуль-гальванометр.

Сопротивления $R_{\phi 1}$, $R_{\phi 2}$, $R_{\phi 3}$ и конденсаторы $C_{\phi 1}$, $C_{\phi 2}$, $C_{\phi 3}$ образуют фильтры, устраняющие продольные и поперечные помехи, возникающие в цепях ТТ под действием внешних электромагнитных помех.

Последовательно с термопарой через вибропреобразователь ВП включен усилитель. К выходным клеммам усилителя подключена одна из обмоток (управляющая) возбуждения реверсивного двигателя РД, вторая обмотка питается от сети. Конденсаторы C_1 и C_2 обеспечивают получение сдвига фаз (90°) между магнитными потоками обмотки возбуждения управляющей обмотки, причем последняя шунтируется конденсатором C_3 , компенсирующим индуктивную составляющую тока в данной обмотке.

Для перемещения диаграммной ленты, на которой осуществляется запись измеренной величины, в потенциометре установлен синхронный двигатель СД, питающийся непосредственно от сети. Его включение производится тумблером K_2 .

Реохорд выполнен из сплава палладий-вольфрам, имеющего высокую стойкость против истирания, контакты движка - из сплава золото-серебро-медь. Все остальные сопротивления измерительного моста изготовлены из манганиновой проволоки.

Медное сопротивление R_m находится в одинаковых температурных условиях со свободными концами ТТ. При постоянной температуре рабочего спая t_2 повышение температуры t_0 приводит к уменьшению т.э.д.с. $E(t_2, t_0)$ на ΔE и увеличению R_m на ΔR_m . Сопротивление рассчитано таким образом, чтобы приращение падения напряжения на нем было точно равно уменьшению т.э.д.с. ТТ, т.е. $I_2 \Delta R_m = \Delta E$. Автоматическое введение поправки производится при изменении температуры свободных концов от 5 до 50°C .

Напряжение U_{AC} , снимаемое с вершин А и С измерительного моста, зависит только от положения движка реохорда. Поэтому каждому значению т.э.д.с. ТТ $E(t_2, t_0)$ соответствует определенное (единственное) положение движка реохорда, при котором эти величины будут равны и ток в цепи термометра будет отсутствовать. В случае $U_{AC} \neq E(t_2, t_0)$ появляется напряжение небаланса измерительной схемы, которое является напряжением постоянного тока. Для усиления сигнала применяют усилители переменного тока как более стабильные и надежные в работе. Преобразование сигнала разбаланса в переменное напряжение производится с помощью вибрационного поляризованного однополюсного переключателя на два положения (ВП).

Таким образом, при наличии в измерительной схеме сигнала небаланса через первичную обмотку трансформатора проходит ток то в одном, то в другом направлении, индуцируя в его вторичной обмотке переменное напряжение (50 Гц), фаза которого в зависимости от знака поступающего сигнала либо совпадает с фазой напряжения питания, либо противоположна ей.

Трансформатор защищают от воздействия внешних магнитных полей специальными экранами. Резонансный конденсатор C_1 , включенный во вторичную обмотку трансформатора, исправляет форму колебаний тока, не являющегося строго синусоидальным. Коэффициент трансформации входного трансформатора составляет 10-17.

Основное усиление входного сигнала небаланса производится в полупроводниковом усилителе, содержащем: входное устройство, усилитель напряжения, усилитель мощности, силовой трансформатор, выпрямитель. Питание от сети переменного тока частотой 50 Гц, 220 В. Потребляемая мощность не превышает 12 В·А, выходная мощность - $1,5$ В·А. Нагрузкой усилителя является обмотка управления реверсивного двигателя РД, перемещающего движок реохорда и стрелку прибора.

3. Бесконтактная пирометрия

3.1 Основные понятия и законы излучения

О температуре нагретого тела можно судить на основании измерения параметров его теплового излучения, представляющего собой электромагнитные волны различной длины. Чем выше температура тела, тем большую энергию оно излучает.

Термометры, действие которых основано на измерении теплового излучения, называют пирометрами излучения (ПИ) или просто пирометрами. Они позволяют контролировать температуры в широком интервале: от 100 до 6000 °С и выше. Одним из главных достоинств является отсутствие влияния измерителя на температурное поле нагретого тела, так как в процессе измерения они не вступают в непосредственный контакт друг с другом. Поэтому данные методы получили название бесконтактных.

Тела характеризуются либо непрерывным спектром излучения (твердые и жидкие вещества), либо - селективным (газы). Участок спектра в интервале длин волн 0,02-0,4 мкм соответствует ультрафиолетовому, участок 0,4-0,76 мкм - видимому, участок 0,76-400 мкм - инфракрасному излучению. Интегральное излучение – это суммарное излучение, испускаемое телом во всем спектре длин волн. Монохроматическим называют излучение, испускаемое при определенной длине волны.

Физические объекты имеют различные оптические свойства: они по-разному поглощают, отражают и пропускают тепловые лучи. Законы излучения выведены для абсолютно черного тела (АЧТ), которое характеризуется тем, что оно поглощает все падающее на него излучение. Зависимость плотности потока спектрального излучения АЧТ от длины волны и температуры описывается уравнением Планка

$$I_{\lambda,0} = C_1 \lambda^{-5} (e^{C_2/\lambda T} - 1)^{-1},$$

где $I_{\lambda,0}$ - плотность потока спектрального излучения, Вт/м³; λ - длина волны, м; T - температура, К; C_1 и C_2 - постоянные Планка ($C_1=3,7413 \cdot 10^{-6}$ Вт·м³; $C_2=1,438 \cdot 10^{-2}$ м·К).

АЧТ испускает лучи всех длин волн от 0 до ∞ при всех температурах, отличных от абсолютного нуля. Плотность потока монохроматического излучения возрастает с повышением температуры, при этом максимум на кривой распределения энергии АЧТ смещается в сторону коротких волн.

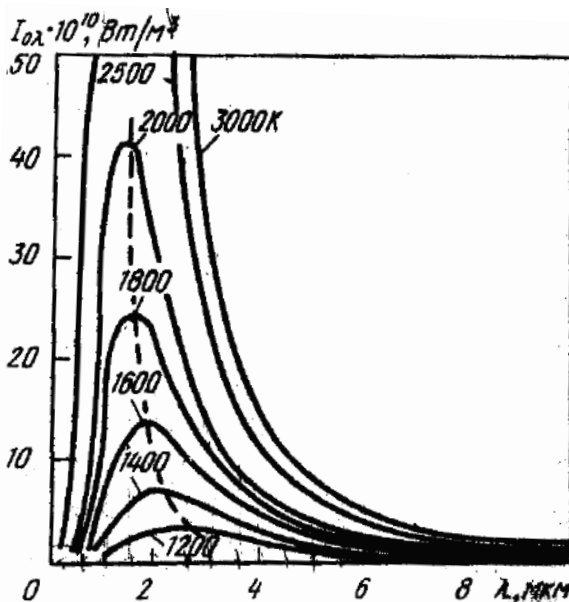


Рисунок 3.1 - Зависимость плотности спектрального излучения АЧТ от длины волны и температуры

Длина волны λ_{max} , соответствующая максимальному значению, связана с температурой через закон смещения Вина

$$\lambda_{\text{max}} T = 2,8978 \cdot 10^{-3} \cdot \text{м} \cdot \text{К}.$$

Для определения плотности потока интегрального излучения АЧТ необходимо просуммировать значение T_λ по всему спектру от $\lambda_1=0$ до $\lambda=\infty$. Результатом является выражение, получившее название закона Стефана-Больцмана

$$E_0 = \sigma_0 T^4,$$

где E_0 - плотность потока интегрального излучения АЧТ, Вт/м²; σ_0 - коэффициент излучения АЧТ [$\sigma_0 = 5,7 \cdot 10^{-8} \text{ Вт/}(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$].

Реальные тела при одинаковых температурах обладают меньшей плотностью потока излучения, которая характеризуется степенью черноты ε (спектральной ε_λ или полной ε_Σ). Коэффициенты ε_λ и ε_Σ зависят от температуры, химического состава и состояния поверхности и находятся в пределах $0 < \varepsilon_\lambda, \varepsilon_\Sigma < 1$. Если $\varepsilon_\lambda < 1$ и не зависит от длины волны (так же как и у АЧТ), то такое излучение называют серым.

На основании рассмотренных законов излучения разработаны пирометры следующих типов: 1) пирометр суммарного (полного) излучения (ПСИ) - измеряется полная энергия излучения; 2) пирометр частичного излучения (ПЧИ) - измеряется энергия в ограниченном фильтром (или приемником) участке спектра; 3) пирометры спектрального отношения (ПСО) - измеряется отношение энергий фиксированных участков спектра.

Пирометры излучения градуируются по АЧТ, поэтому при их применении в реальных условиях получаются значения температур, в большинстве случаев отличающиеся от действительных и получившие название условных ($T_{\text{усл}}$). Для перехода от условной температуры к действительной в показания пирометров вводятся соответствующие поправки.

В зависимости от типа пирометра различаются: радиационная, яркостная и цветовая температуры.

Радиационной температурой реального тела T_p называют температуру, при которой полная мощность АЧТ равна полной энергии излучения данного тела при действительной температуре T_d . На основании данного определения, используя закон Стефана-Больцмана, получим

$$\sigma_0 T_p^4 = \varepsilon_{\Sigma} \sigma_0 T_d^4,$$

откуда $T_d = T_p \sqrt[4]{1/\varepsilon_{\Sigma}}$.

Разность между действительной и радиационной температурами составит

$$\Delta T = T_d - T_p = T_p \left(\sqrt[4]{1/\varepsilon_{\Sigma}} - 1 \right),$$

или $\Delta T = T_d \left(1 - \sqrt[4]{\varepsilon_{\Sigma}} \right).$

Для реальных тел интегральная степень черноты $\varepsilon_{\Sigma} < 1$, поэтому радиационная температура всегда меньше действительной температуры объекта измерения.

Яркостей температурой реального тела T_y называют температуру, при которой плотность потока спектрального излучения АЧТ равна плотности потока излучения реального тела для той же длины волны (или узкого интервала спектра) при действительной температуре T_d . Соотношение между данными температурами записывается в следующем виде

$$\frac{1}{T_y} - \frac{1}{T_d} = \frac{\lambda}{C_2} \ln \frac{1}{\varepsilon_{\lambda}} = a.$$

Так как $\varepsilon_{\lambda} < 1$, то и яркостная температура всегда ниже действительной, причем они различаются сильнее при меньшем значении ε_{λ} . Погрешность данного ПИ равна

$$\Delta T_{я} = T_{я} - T_{д} = -\frac{aT_{я}^2}{1 - aT_{я}} \text{ или } \Delta T_{я} = T_{д} - T_{я} = \frac{aT_{д}^2}{1 + aT_{д}}.$$

Цветовой температурой реального тела $T_{ц}$ называют температуру, при которой отношение плотностей потоков излучения АЧТ для двух длин волн λ_1 и λ_2 равно отношению плотностей потоков излучения реального тела, для тех же длин волн при действительной температуре $T_{д}$. Связь между данными температурами записывается в виде следующего выражения

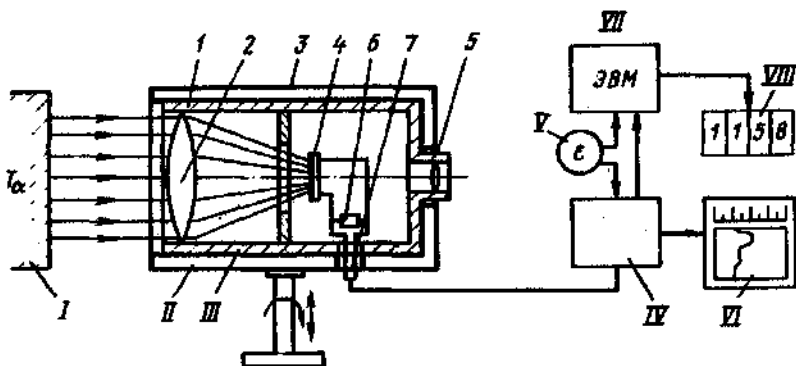
$$\frac{1}{T_{д}} - \frac{1}{T_{ц}} = \frac{\ln(\varepsilon_{\lambda_1} / \varepsilon_{\lambda_2})}{C_2 \left(\frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda_2} \right)} = b,$$

где $\varepsilon_{\lambda_1}, \varepsilon_{\lambda_2}$ - спектральные степени черноты объекта при соответствующей длине волн.

3.2 Принцип действия и устройство пирометров излучения

Электромагнитное излучение, характеризующее степень нагретости - действительную температуру $T_{д}$ объекта контроля I (металл в печи или на стане, кладка агрегата и т.п.) поступает на первичный преобразователь II, который является датчиком температуры или, собственно, пирометром излучения. Корпус ПИ обычно устанавливается в специальной арматуре III, обеспечивающей его защиту от перегрева, механического повреждения и возможность наведения на объект измерения таким образом, чтобы приемник ПИ воспринимал только излучение объекта. Вторичный измерительный преобразователь IV предназначен для усиления и преобразования в выходной нормированный сигнал сигнала низкого уровня (напряжения или тока), развиваемого приемником излучения и пропорционального измеряемой температуре.

Данный преобразователь может также обеспечивать запоминание максимального значения измеряемой величины, линеаризацию сигнала. Корректор V служит для ввода в измерительный преобразователь IV или микро-ЭВМ VII фактического значения величины интегральной или спектральной степени черноты объекта контроля. Измеренное значение температуры фиксируется с помощью самопишущего VI или цифрового VIII приборов. Микро-ЭВМ VII может заменить преобразователь IV либо обеспечить дополнительные функции: распечатку измеренных значений; хранение необходимых значений степени черноты в функции от уровня измеряемых температур, типа объекта и спектральных характеристик; автоматический расчет корректирующих поправок на фоновое излучение кладки и т.п.



1 – корпус; 2 – объектив; 3 – диафрагма; 4 – приемник излучения; 5 – окуляр; 6 – компенсатор температуры корпуса; 7 – штуцер

Рисунок 3.4 - Принципиальная схема устройства для бесконтактного измерения температуры

В зависимости от решаемых задач, вида материала линзы (интервала пропускаемых длин волн), чувствительности приемника излучения, реализуются конкретные конструкции приборов в виде стационарных или переносных ПИ, в состав которых входят те или иные структурные составляющие.

В ряде конструкций оптическая система ПИ выполняется в виде -световодов; прямых или гибких, что позволяет уменьшить размеры пирометра и площадки визирования. Преимущество ПИ с гибкими стекловолоконными световодами: 1) отсутствие контакта с измеряемым объектом, что особенно важно при контроле температур движущихся объектов; 2) у измерительной системы практически отсутствует инерционность, так как время срабатывания составляет $\sim 1,25$ мс; 3) сигнал устойчив по отношению к внешним воздействиям (индуктивному, механическому и т.п.); 4) аппаратура активно противостоит нагреву (до 1200°C), давлению (~ 210 МПа), воздействию электрического поля и высокого напряжения, химическому воздействию агрессивных сред; 5) с помощью систем линз можно реализовать большой диапазон длин световодов (до 10 м) и снимать информацию с площадок объекта очень малых размеров, вплоть до 0,1 мм; 6) возможность переноса лучистой энергии в 70 раз больше по сравнению с другими ПИ, что обеспечивает большую точность измерений и разрешающую способность аппаратуры.

Пирометры суммарного излучения

Пирометры суммарного излучения измеряют радиационную температуру тела, поэтому их часто называют радиационными. Принцип действия данных измерителей температуры основан на использовании закона Стефана-Больцмана. Однако в случае применения оптических систем в ПСИ определение температуры ведется по плотности интегрального излучения не во всем интервале длин волн от $\lambda_1=0$ до $\lambda=\infty$, а в значительно меньшем: для стекла рабочий спектральный диапазон составляет 0,4-2,5, для плавленого кварца 0,4-4, для флюорита 0,4- 8 мкм.

Датчик пирометра выполняется в виде телескопа, линза объектива которого фокусирует на термочувствительном приемнике излучение нагретого тела. В качестве чувствительного элемента используются термопары, термобатареи, болометры (металлические и полупроводниковые), биметаллические спирали и т.п. Наиболее широко применяются термобатареи, в которых используется 8-14 миниатюрных термопар (например, хромель-копелевые), соединенных последовательно. Поток излучения попадает на расклепанные в виде тонких зачерненных лепестков рабочие концы 4 термопар 2. Свободные концы термопар привариваются к тонким пластинкам 1, закрепленным на слюдяном кольце 3. Металлические выводы 5 служат для подсоединения к измерительному прибору, в качестве которого обычно используются потенциометры или милливольтметры.

Рабочие концы термопар поглощают падающую энергию и нагреваются. Свободные концы находятся вне зоны потока излучения и имеют температуру корпуса телескопа. В результате возникновения перепада температур термобатарея развивает т.э.д.с., пропорциональную температуре рабочих спаев, а следовательно, и температуре объекта измерения. Градуировка пирометров производится при температуре корпуса 20 ± 2 °С, поэтому повышение данной температуры приводит к уменьшению перепада температур в термопарах приемника излучения и к появлению значительных дополнительных погрешностей. Так, при температуре корпуса 40 °С дополнительная погрешность (при прочих равных условиях) составит ± 4 °С.

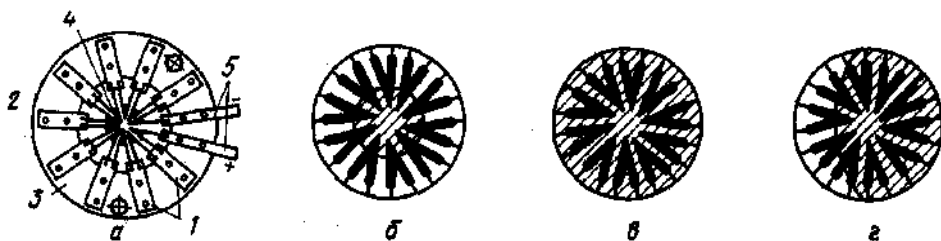


Рисунок 3.5 - Устройство приемника излучения телескопа ПСИ (а) и вид в окуляре взаимного расположения излучателя (объекта измерения температуры) и термобатареи; б - расстояние от телескопа до излучателя слишком велико; в - установка телескопа правильная; г - направление телескопа неправильное

Для снижения этой погрешности пирометры снабжаются компенсирующими устройствами: электрическим шунтом или биметаллической пружиной.

Устройство телескопа ПСИ, который включает: корпус 1; объектив 2 с линзой, устанавливаемой во втулке, ввинчиваемой в корпус; полевую диафрагму 3; чувствительный элемент 4, состоящий из блока термопар; окуляр 5, включающий линзу и защитное стекло; компенсационное медное сопротивление 6, шунтирующее термобатарею и обеспечивающее уменьшение влияния изменений температуры корпуса телескопа на показания ПИ; штупцер 7 для вывода соединительных проводов от термобатареи к вторичному прибору (или преобразователю).

Диафрагма, устанавливаемая в телескопе, ограничивает телесный угол визирования, что исключает влияние на показания размеров излучателя и его расстояния от пирометра. При этом на термобатарею попадает излучение только с определенно-

го небольшого участка объекта измерения. Размеры этого участка определяются по показателю визирования, который является отношением наименьшего диаметра излучателя к расстоянию от объекта измерения до объектива телескопа. При этом изображение круга, вписанного в излучатель, полностью перекрывает отверстие диафрагмы 2, находящейся перед термобатареей. Телескопы с показателем визирования более $1/16$ являются широкоугольными, при этом показателе равном или меньшем $1/16$ - узкоугольными.

ПСИ имеет меньшую точность по сравнению с другими пирометрами. Методические погрешности измерения температуры при использовании ПСИ возникают: вследствие значительной ошибки определения интегральной степени черноты ϵ_{Σ} ,

из-за неправильной наводки телескопа на излучатель, Из-за влияния излучения кладки (измерение температуры в печах) и из-за поглощения энергии водяными парами SO_2 и CO_2 , содержащихся в слое атмосферы, находящейся между излучателем и пирометром. Вследствие последней причины оптимальным считается расстояние 0,8-1,3 м.

ПСИ измеряют температуру в интервале от 100 до 2500 $^{\circ}\text{C}$. Основная допустимая погрешность технических промышленных пирометров возрастает с увеличением верхнего предела измерения: при температуре 1500 $^{\circ}\text{C}$ он составляет ± 15 $^{\circ}\text{C}$, при 2000 $^{\circ}\text{C}$ - ± 20 $^{\circ}\text{C}$, при 2500 $^{\circ}\text{C}$ - ± 25 $^{\circ}\text{C}$.

Пирометры частичного излучения

К данному типу пирометров, измеряющих яркостную температуру объекта, относятся монохроматические оптические пирометры и фотоэлектрические пирометры, измеряющие энергию потока в узком диапазоне длин волн.

Оптические пирометры. Принцип действия оптических пирометров основан на использовании зависимости плотности потока монохроматического излучения от температуры (закон Планка).

Схема оптического пирометра с "исчезающей" нитью, принцип действия которого основан на сравнении яркостей объекта измерения и градуированного источника излучения в определенной длине волны.

Изображение излучателя 1 линзой 2 и диафрагмой 4 объектива пирометра фокусируется на плоскости нити накаливания лампы 5. Оператор через диафрагму 6, линзу 8 окуляра и красный светофильтр 7 на фоне раскаленного тела видит нить лампы.

Перемещая движок реостата 11, оператор изменяет силу тока, проходящего через лампу, и добивается уравнивания яркости нити и яркости излучателя. Вели яркость нити меньше яркости тела, то она на его фоне выглядит черной полоской, при большей температуре нити, она будет выглядеть как светлая дуга на более темном фоне. При равенстве яркостей излучателя и нити, последняя "исчезает" из поля зрения оператора. Этот момент свидетельствует о равенстве яркостных температур объекта измерения и нити лампы.

Питание лампы осуществляется с помощью батареи 10. Прибор 9, фиксирующий силу тока, протекающего в измерительной цепи, заранее проградуирован в значениях зависимости между силой тока и яркостной температурой, что позволяет производить считывание результата измерения в $^{\circ}\text{C}$. Красный светофильтр 7 пропускает область с шириной около 0,01 мкм и с эффективной длиной волны 0,65 мкм.

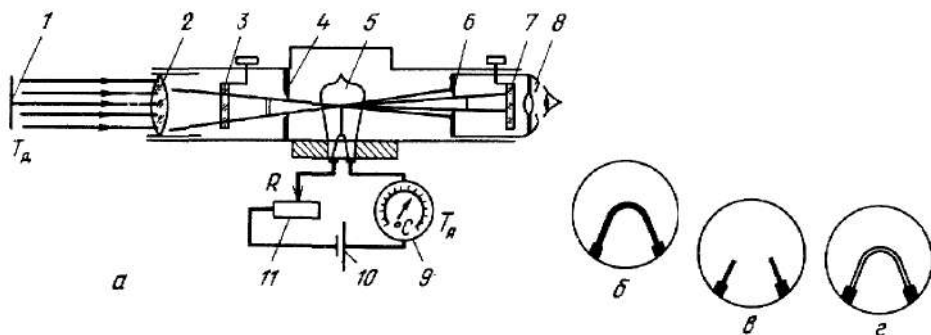


Рисунок 3.6 - Схема оптического пирометра с исчезающей нитью

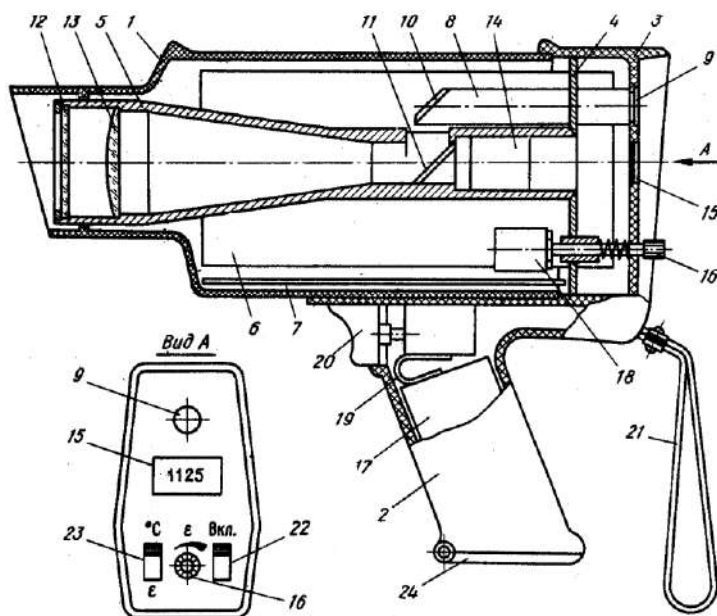
В лампе накаливания применяется вольфрамовая нить, которая при высоких температурах начинает интенсивно испаряться. Поэтому для сохранения стабильной градуировки пирометра, осуществляют нагрев лампы только до яркостной температуры $1400-1500^{\circ}\text{C}$, а при измерении более высоких температур яркость излучателя ослабляют с помощью поглощающего стекла 3, устанавливаемого между объектом и лампой.

Существуют конструкции оптических ПИ, в которых в процессе измерения температуры накал лампы поддерживается постоянным, а варьируется с помощью поглощающего клина, расположенного между лампой и объектом, видимая яркость последнего. Поглощающий клин имеет плавно изменяющийся в зависимости от его перемещения коэффициент пропускания. Таким образом яркостная температура определяется через угол поворота клина: шкала его перемещения проградуирована в градусах соответствующей условной температуры. Данная конструкция оптического ПИ имеет меньшую точность, чем пирометры с "исчезающей" нитью (с лампой переменного накала). Данный тип пирометров позволяет измерять температуры, в широком интервале от 800 до 10000°C . Для оптических пирометров промышленного применения в интервале температур $1200-2000^{\circ}\text{C}$ основная допустимая погрешность измерения составляет $\pm 20^{\circ}\text{C}$. На точность измерения влияет неопределенность и изменяемость спектральной степени черноты, возможное изменение интенсивности излучения за счет ослабления в промежуточной среде, а также за счет отражения посторонних лучей. Максимальное расстояние до измеряемого объекта обычно ограничивают $5-6$ м, минимальное расстояние не должно быть менее $0,7$ м.

Фотоэлектрические пирометры данного типа обеспечивают автоматическое непрерывное измерение и регистрацию температур. Их принцип действия основан на использовании зависимости интенсивности излучения в узком интервале длин волн спектра. В качестве приемников в данных устройствах используются: фотодиоды, фотосопротивления, фотоэлементы и фотоумножители.

Фотоэлектрические ПЧИ делятся на две группы: 1) пирометры, в которых мерой температуры объекта является непосредственно величина фототока приемника излучения; 2) пирометры, которые содержат стабильный источник излучения, причем фотоприемник служит лишь индикатором равенства яркостей данного источника и объекта.

ПЧИ первой группы имеют простую конструкцию. Поток от объекта с помощью линзы и диафрагмы фокусируется на приемной площадке приемника излучения, в качестве которых в основном используются германиевые (спектральный диапазон 0,8-1,8 мкм) и кремниевые (0,5-1,1 мкм) фотодиоды, причем последние измеряют более высокие температуры. В цепь фотодиода, работающего в генераторном режиме, последовательно включается сопротивление нагрузки. Вторичный измерительный преобразователь обеспечивает получение усиленного нормированного выходного сигнала и его передачу на быстродействующий регистрирующий прибор или в АСУ ТП. Данные пирометры характеризуются малой инерционностью и высокой надежностью в работе. Пределы измерения от 450 до 2500 °С и выше. Основная допускаемая погрешность $\pm 0,6\%$.



1 - кожух приемной камеры; 2 - рукоятка; 3 - индикаторная панель; 4 - переходная планка; 5 - кронштейн; 6, 7 - платы электронной части прибора; 8 - окуляр; 9 - окно окуляра; 10 - зеркало окуляра; 11 - зеркало; 12 - защитное стекло; 13 - линза объектива; 14 - приемник излучения; 15 - цифровое табло; 16 - ручка установки; 17 - блок питания; 18 - блок образования корректирующего сигнала на степень черноты объекта; 19 - клеммы подключения питания; 20 - кнопка включения запоминания измеренного значения температуры; 21 - страховочный ремень; 22 - тумблер включения питания прибора; 23 - переключатель табло; 24 - крышка с защелкой

Рисунок 3.7 – Устройство переносного пирометра частичного излучения

При использовании в качестве приемника излучения фотосопротивлений с эффективными длинами волн в интервале 2,2-3,43 мкм (2,2; 2,3; 2,4; 2,5; 3,43) ПЧИ

позволяют контролировать температуру в интервале от 50 до 1400 °С с максимальной основной погрешностью 1,0-2,5 %. Стационарные ПЧИ фотодиодного типа имеют небольшие габариты (диаметр корпуса 25 и 50 мм, длина 195 и 275 мм). Показатель визирования колеблется от 1/25 до 1/300. Приемник излучения термостатирован. Температура термостатирования (48 °С) регулируется с помощью специального транзистора вторичным измерительным преобразователем.

Переносные ПЧИ обеспечивают измерение температуры в интервале 15-1500 °С при рабочем расстоянии от ПИ до объекта 0,6-15 м с допускаемой основной погрешностью 1,0-2,5 % и показателями визирования от 1/15 до 1/250.

Конструктивно ПИ выполнен в виде малогабаритного переносного прибора, по своему внешнему виду напоминающему пистолет. Оператор с помощью переключателя 23 и корректора 16, устанавливает на табло 15 величину степени черноты измеряемого объекта. Затем переключатель 23 переводится в крайнее верхнее положение (°С), и оператор через окно окуляра 9 наводит ПИ на объект. Нажатием на кнопку включения запоминания 20 на цифровом табло фиксируется величина измеренного значения температуры.

Таким образом, данный ПИ обеспечивает индикацию измеряемой температуры и задаваемой степени черноты, запоминание текущего и максимального значений температуры, индикацию разряда аккумуляторной батареи питания. Установка величины степени черноты производится в пределах от 0,1 до 1,0 с дискретностью 0,01.

Пирометры спектрального отношения

Пирометры данного типа измеряют цветовую температуру объекта по отношению интенсивностей излучения в двух определенных участках спектра, каждый из которых характеризуется эффективной длиной волны λ_1 и λ_2 .

Схема двухканального пирометра спектрального отношения (ПСО), в котором преобразование энергии излучения в электрические сигналы производится с помощью двух кремниевых фотодиодов. Поток излучения от объекта измерения 1 с помощью оптической системы, состоящей из линз 2, апертурной и полевой диафрагм 3, передается на интерференционный светофильтр 4. Последний обеспечивает выделение двух потоков, каждый из которых характеризуется собственным спектром (эффективной длиной волны). Данные потоки попадают на кремниевые фотодиоды 7, которые преобразуют излучение в фототок, протекающий через сопротивления R_1 и R_2 , включенные в измерительную схему вторичного регистрирующего прибора - логометра. Разность падений напряжений на сопротивлениях подается на вход усилителя 5, выходной сигнал которого поступает на реверсивный двигатель 6, перемещающий движок реохорда R_p и стрелку относительно шкалы до наступления баланса, соответствующего измеряемой температуре.

Интерференционный светофильтр 4 является полупрозрачным зеркалом, имеющим высокий коэффициент пропускания в одной и высокий коэффициент отражения в другой области спектра. Зеркало 8 и окуляр 9 обеспечивают визуальную наводку объектива пирометра на объект измерения. Для уменьшения погрешности от влияния окружающей температуры светофильтр 4 и приемники излучения 7 помещены в термостат.

В одноканальном ПСО два различных монохроматических потока излучения, получаемых с помощью двух различных светофильтров (например, красного и синего), попеременно подаются на один приемник излучения.

В ПСО первого типа точность измерения зависит от стабильности приемников излучения каждого канала.

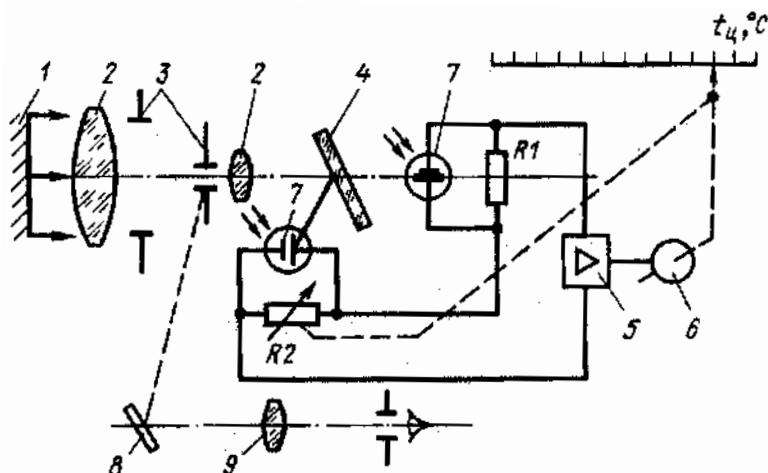


Рисунок 3.8 – Схема пирометра спектрального отношения

Одноканальный принцип построения пирометра снижает требования к постоянству характеристик элементов схемы.

ПСО используются для измерения температур твердого и расплавленного металла в широком интервале температур от 50 до 3500 °C и имеют класс точности 1 и 1,5 (в зависимости от предела измерения). Данные пирометры имеют в 3-5 раз меньшую методическую погрешность, связанную с изменением степени черноты излучателя. На их показания значительно меньше влияет поглощение промежуточной среды. Однако в тех случаях, когда объект характеризуется селективным излучением (степень черноты при одной и той же температуре резко изменяется с длиной волны), погрешность ПСО может быть выше погрешности пирометров излучения других типов. Необходимо отметить также, что пирометры спектрального отношения более сложны и менее надежны, чем другие приборы.

4. Измерение давления и перепада давления

4.1 Общие сведения. Единицы измерения давления

Одним из важных параметров, влияющих на ход процессов в металлургических печах, является давление: абсолютное, атмосферное, избыточное и вакуумметрическое.

Атмосферное давление создается массой воздушного столба земной атмосферы. Он имеет переменную величину, зависящую от высоты местности над уровнем моря, географической широты и метеорологических условий.

Избыточное давление определяется разностью между значениями абсолютного атмосферного давления

$$P_{\text{изб}} = P_{\text{абс}} - P_{\text{ат}},$$

где $P_{\text{изб}}$ - избыточное давление; $P_{\text{абс}}$ - абсолютное давление; $P_{\text{ат}}$ - атмосферное давление.

Под вакуумом (разрежением) понимают такое состояние газа, при котором его давление меньше атмосферного. Количественно вакуумметрическое давление определяется разностью между значениями атмосферного и абсолютного давления внутри вакуумной системы

$$P_{\text{вак}} = P_{\text{ат}} - P_{\text{абс}},$$

где $P_{\text{вак}}$ - вакуумметрическое давление.

За единицу давления в СИ принято давление, называемое паскалем (Па). Оно создается силой в 1 ньютон, равномерно распределенной по поверхности в 1 м^2 . Эта небольшая величина пригодна для измерения очень малых давлений. Для измерения средних и высоких давлений целесообразно применять кратные единицы: килопаскаль (кПа) и мегапаскаль (МПа) и др.

При измерении давления в движущихся средах различают: полное, статическое и динамическое давление. Статическое - это давление, зависящее от запаса потенциальной энергии газовой (жидкостной) среды, и определяется через статический напор. Оно может быть избыточным или вакуумметрическим, в частном случае оно равно атмосферному. Динамическое - это давление, обусловленное скоростью движения потока газа (жидкости). Определяется оно через скоростной (динамический) напор по формуле

$$P_{\text{д}} = \rho W^2 / 2,$$

где $P_{\text{д}}$ - динамическое давление; ρ - плотность движущегося вещества; W - скорость движущегося потока.

Полное давление $P_{\text{п}}$ движущейся среды складывается из статического $P_{\text{ст}}$ и динамического $P_{\text{д}}$ давлений

$$P_{\text{п}} = P_{\text{ст}} + P_{\text{д}}.$$

В дальнейшем под термином "давление" подразумевается статическое давление.

Приборы для измерения давления можно разделить на следующие основные группы: 1) жидкостные, в которых измеряемое давление уравнивается давлением столба жидкости соответствующей высоты; 2) деформационные, в которых измеряемое давление определяется по величине деформации различных упругих чувствительных элементов или по развиваемой ими силе; 3) грузопоршневые, в которых измеряемое или воспроизводимое давление уравнивается давлением, создаваемым массой поршня и грузов; 4) электрические, действие которых основано на изменении электрических свойств некоторых материалов при воздействии на них давления.

По наименованию приборы для измерения давления подразделяются на барометры (для измерения атмосферного давления); манометры (для измерения избыточного давления); вакуумметры (для измерения вакуумметрического давления); мановакуумметры (для измерения избыточного и вакуумметрического давления); манометры абсолютного давления (для измерения давления, отсчитываемого от абсолютного нуля); дифференциальные манометры для измерения разности (перепада) давления.

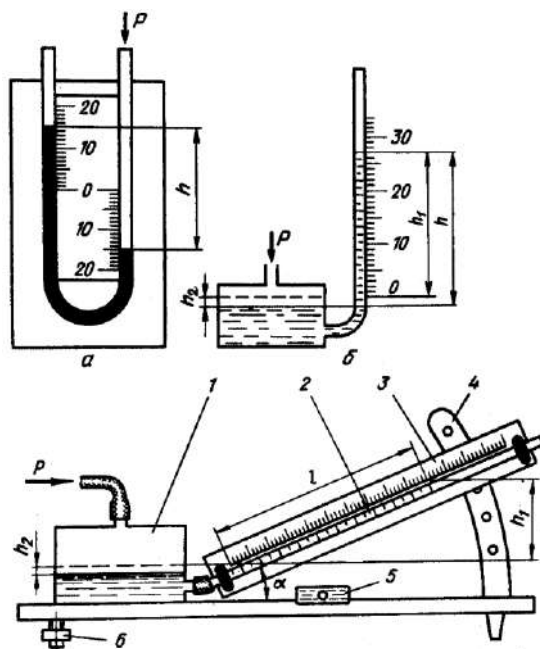
Манометры, вакуумметры и дифференциальные манометры, предназначенные для измерения небольших давлений, разрежений и разности давлений газовых сред (до 40 кПа), называют соответственно напоромерами, тягомерами и тягонапоромерами.

Приборы, предназначенные для высокоточных измерений малых давлений (обычно не превышающих 4,0 кПа), называют микроманометрами.

4.2 Жидкостные приборы

Действие жидкостных приборов основано на гидростатическом принципе, при котором измеряемое давление уравнивается давлением столба (рабочей) жидкости. Разница уровней в зависимости от плотности жидкости является мерой давления.

Простейшим прибором для измерения давления при разности давлений является двухтрубный (или U-образный) манометр, представляющий собой стеклянную трубку, согнутую по форме вытянутой буквы U, заполненную жидкостью до нулевой отметки, и прикрепленную к панели, на которой имеется шкала для отсчетов. Один конец трубки манометра сообщается с атмосферой, другой подключается к объекту, где измеряется давление. Трубка, связанная со средой большего давления, обозначается знаком плюс (плюсовая трубка), а трубка, связанная со средой меньшего давления, - знаком минус (минусовая трубка).



а - U-образного; б - чашечного; в - микроманометра с наклонной трубкой; 1 - широкий сосуд; 2 - измерительная трубка; 3 - шкала; 4 - приспособление для фиксации угла наклона трубки; 5 - указатели уровня; 6 - винт установки горизонтального уровня

Рисунок 4.1 – Схемы жидкостных манометров

Рабочей жидкостью может быть ртуть, спирт, трансформаторное масло или вода. Под действием измеряемого давления жидкость в плюсовой трубке опускается, а в минусовой поднимается, разность гидростатических уровней и определяет величину измеряемого давления согласно выражению

$$P = h \rho g.$$

где P - измеряемое давление, Па; h - разность уровней жидкости, м; ρ - плотность жидкости, кг/м^3 ; g - ускорение свободного падения, м/с^2 .

Равенство показывает, что точность измерения давления определяется точностью отсчета h , точностью определения плотности жидкости ρ и не зависит от сечения трубки.

Величину давления по шкале двухтрубного манометра определяют по двум уровням, отсчитывая высоту столба жидкости в одной трубке вверх от нуля, а в другой - вниз, и оба значения складывают. Верхний предел измерения двухтрубных манометров составляет 1-10 кПа. В этом случае приведенная погрешность измерения лежит в интервале 2-0,2%.

Более удобным прибором является однотрубный (чашечный) манометр, в котором одна из трубок заменена сосудом, диаметр которого в несколько раз больше диаметра трубки. Манометр заполняют рабочей жидкостью до тех пор, пока мениск в трубке не устоит на нулевую отметку по шкале прибора. Для измерения избыточного давления широкий сосуд соединяют с измеряемым пространством, а конец трубки оставляют открытым, при этом уровень жидкости в трубке поднимается, а в широком сосуде опускается, но вследствие значительно большего поперечного сечения сосуда понижение уровня в нем будет очень малым.

При измерении вакуумметрического давления объект, где измеряют вакуум, соединяют с трубкой, а широкий сосуд - с атмосферой. При этом жидкость в измерительной трубке будет подниматься до тех пор, пока вес столба жидкости в трубке не уравнивает разность между атмосферным давлением и вакуумом контролируемой среды. В этом приборе давление или разрежение будет определяться равенством

$$P = h \rho g (1 + f/F) = h \rho g (1 + d^2/D^2).$$

где f - сечение трубки, m^2 ; F - сечение широкого сосуда, m^2 ; d - диаметр трубки, m ; D - диаметр широкого сосуда, m .

Обычно приборы имеют отношение $f/F < 1/400$ или $d/D < 1/20$ и понижение уровня h_2 в сосуде незначительно, им можно пренебречь и отсчет вести только по стеклянной трубке h_1 что упрощает измерение и уменьшает погрешность отсчета.

Однотрубные манометры имеют верхний предел измерения 1,6-10 кПа, приведенная погрешность измерения составляет 0,4-0,025 %. Измерение малых давлений (до 2 кПа) обычными двухтрубными или однотрубными приборами дает большую погрешность из-за неточности отсчета. В этом случае применяют микроманометры, простейшим из которых является стеклянный однотрубный микроманометр с наклонной трубкой, у которого трубка расположена не вертикально, а под углом α к горизонту; при этом точность измерения увеличивается в несколько раз. Учитывая, что $h_1 = l \cdot \sin \alpha$, измеряемое давление определим по формуле

$$P = l \rho g \sin \alpha (1 + f/F).$$

где l - отсчет по наклонной трубке, m ; α - угол наклона трубки.

Отношением f/F , как величиной весьма малой можно пренебречь, и равенство примет вид

$$P = l \rho g \sin \alpha.$$

Чем меньше угол α , тем меньше предел измерения прибора и тем больше растянуты деления шкалы, что и предопределяет высокую точность измерения.

Чашку микроманометра заполняют спиртом определенной плотности. Плотность спирта меньше плотности воды, и он меньше смачивает стекло. Вследствие этого спирт дает больший, чем вода, масштаб отсчета и меньший мениск. Так как отсчет по микроманометру с наклонной трубкой зависит от угла наклона этой труб-

ки, то во время измерения прибор должен находиться в строго горизонтальном положении. Для этой цели микроманометр снабжен уровнем, по которому устанавливают прибор перед началом измерения и периодически проверяют положение уровня жидкости при отключенном приборе.

Недостатками жидкостных приборов являются: отсутствие дистанционной передачи показаний, небольшой предел измерений, недостаточная наглядность показаний и хрупкость. Поэтому жидкостные приборы как стационарные в промышленности используются редко. В то же время благодаря своей простоте, дешевизне и относительно высокой точности измерения они широко распространены в лабораториях и в промышленности при эпизодических измерениях и при проверке приборов других типов.

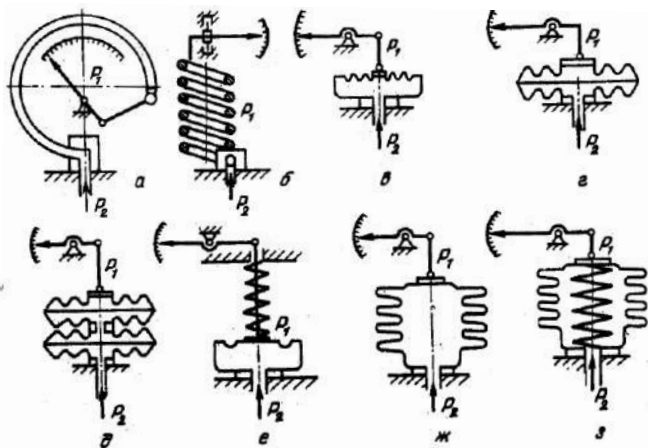
4.3 Манометры с упругими чувствительными элементами

Деформационные приборы широко применяют для измерения давления и его перепада благодаря их портативности, простоте и большому диапазону измерения – от нескольких паскалей до тысячи мегапаскалей. Принцип действия данных устройств основан на уравнивании силы, создаваемой давлением или вакуумом контролируемой среды на чувствительный элемент, силами упругих деформаций различного рода упругих элементов. Эта деформация в виде линейных или угловых перемещений передается показывающей или самопишущей части прибора, а также может быть преобразована в электрический или пневматический сигнал для дистанционной передачи его на измерительный (вторичный) прибор или другие средства контроля или регулирования.

В деформационных приборах в качестве чувствительных элементов используют одновитковые трубчатые пружины, многovitковые трубчатые пружины, упругие мембраны, упругие мембранные коробки, двойные упругие мембранные коробки, пружинно-мембранные с гибкой (вялой) мембраной, сильфонные и пружинно-сильфонные.

Для изготовления мембран, сильфонов и трубчатых пружин необходим материал с высокой упругостью, антикоррозионностью, малой зависимостью параметров от изменения температуры, который также должен хорошо поддаваться технологической обработке, пайке и сварке. Указанным требованиям отвечают бронза, латунь и хромоникелевые сплавы.

Статическая характеристика упругого элемента представляет собой зависимость деформации K от приложенного давления P , т.е. $K = f(P)$. В большинстве случаев эта зависимость имеет нелинейный характер, причем кривая нагружения не совпадает с кривой, соответствующей разгрузению. Кроме того, при снятии нагрузки, т.е. при $P = 0$, имеет место остаточный сигнал вследствие продолжающейся деформации материала. Это объясняется наличием гистерезиса материала, из которого изготовлен упругий чувствительный элемент.



Ри-

сунок 4.2 - Деформационные чувствительные элементы

Мембранные приборы. Мембранные приборы применяют для измерения небольших давлений нейтральных газовых сред. Принцип Действия приборов основан на уравнивании избыточного, абсолютного или вакуумметрического давления силами упругой деформации мембраны. Упругие элементы выполняют в форме тонкостенных металлических коробок, состоящих из двух гофрированных круглых мембран, выполненных из бериллиевой бронзы и сваренных между собой по контуру. Если внутреннюю полость мембранной коробки соединить с измеряемой средой, то по прогибу ее жесткого центра можно судить о величине измеряемого избыточного давления. Такие мембраны называются манометрическими.

При откачке воздуха из внутренней полости мембранной коробки до 13,3-40 Па и дальнейшей запайке получают anerоидную коробку, с помощью которой измеряют абсолютное давление. Упругие мембранные коробки, применяемые для измерения атмосферного давления, называют барометрами-анероидами. В этом случае атмосферное давление воздействует на герметически закрытую мембранную коробку, внутренняя полость которой находится под вакуумом.

Устройство показывающего напоромера. Чувствительным элементом служит мембранная коробка, соединенная с измеряемой средой посредством трубки. Мембрана прикреплена к корпусу прибора с помощью штуцера. Изменение давления измеряемой среды вызывает соответствующее изменение прогиба мембранной коробки. При этом поводок, прикрепленный к верхней части мембранной коробки, поворачивает сидящий на оси рычаг. Под воздействием разности давлений мембранная коробка изменяет степень сжатия, вызывая перемещение рычага, тяги и рычага, сидящего на оси. На этой же оси закреплен стопорным винтом указательная стрелка. Конец стрелки передвигается вдоль шкалы.

Напоромеры, тягомеры и тягонапоромеры по своему устройству аналогичны. Первые изготавливаются с шкалой 250-25000 Па, а тягомеры - с шкалой 120-12000 Па. Класс точности данных приборов 1,5-2,5.

Сильфонные приборы. Сильфонные приборы предназначены для измерения избыточного и вакуумметрического давления воздуха и неагрессивных газов и используются как напоромеры, тягомеры и тягонапоромеры с пределами измерения до 40 кПа, как манометры до 400 кПа, вакуумметры до -100 кПа и мановакуумметры $(-100) \div (0) \div (+300 \text{ кПа})$.

Принцип действия сильфонных приборов основан на уравнивании измеряемого давления силами упругой деформации сильфона и диапазонных цилиндрических пружин. Чувствительным элементом прибора является сильфон, представляющий собой тонкостенную цилиндрическую емкость с поперечной гофрировкой, которая изменяет свои линейные размеры при перепаде давлений внутри и вне ее. Сильфоны выполняют из фосфористой бронзы, коррозионно-стойкой стали или медноникелевого сплава. Сильфоны изготавливают прессованием с эффективной площадью $F_{\text{эф}} = \pi [(D + d)/4]^2 = 0,1 \div 160 \text{ см}^2$ с числом волн $n = 4; 6; 10 \text{ и } 16$.

Применяют сильфоны диаметром 8-150, толщиной стенки 0,1-0,3 мм. Сильфоны соединяются с глухими доньшками сваркой или пайкой. Действие на сильфон давления (внешнего или внутреннего) приводит к изменению длины его, сжатию или растяжению в зависимости от направления действующего усилия. Упругая характеристика сильфонов в пределах рабочего диапазона близка к линейной. Для увеличения жесткости и уменьшения влияния нелинейности характеристики внутрь сильфона помещают проволочную цилиндрическую винтовую пружину. Вследствие этого измеряемое давление уравнивается силой упругой деформации сильфона и винтовой пружины.

Конструктивно приборы состоят из двух частей: сильфонного блока и показывающей (самопишущей) части, встроенных в один корпус.

Сильфонные манометры используются также в качестве вторичных измерительных приборов в комплекте с пневматическими преобразователями для передачи показаний на расстояние. В этом случае вторичные приборы имеют пределы измерения 0-100 кПа.

Трубчато-пружинные приборы. Приборы с трубчатой пружиной принадлежат к числу наиболее распространенных манометров, вакуумметров и мановакуумметров.

Действие их основано на использовании зависимости между упругой деформацией трубчатой пружины и внутренним давлением. Трубчатая пружина представляет собой тонкостенную согнутую по дуге окружности трубку вытянутого поперечного сечения. Изготавливаются трубчатые пружины большей частью из медных сплавов или из коррозионностойкой стали в зависимости от назначения прибора и пределов измерения. Трубку в приборе располагают таким образом, чтобы малая ось сечения лежала в полости изгиба трубки. При заполнении полости трубки газом или жидкостью под давлением происходит деформаций сечения в направлении приближения к круглому, это вызывает появление усилий, которые заставляют трубку разгибаться. Таким образом, в пружинных приборах используется свойство, спиральной трубки раскручиваться при увеличении давления внутри нее и сжиматься при уменьшении давления.

4.4 Электрические манометры и вакуумметры

В металлургических процессах измерение давлений в подавляющем большинстве случаев обеспечивается деформационными манометрами и вакуумметрами. Электрические приборы используются главным образом для специальных целей, например при измерениях сверхвысоких давлений, глубокого вакуума или давлений, пульсирующих с высокой частотой.

В вакуумной металлургии для измерения малых давлений деформационные приборы охватывают нижний предел измеряемых давлений порядка $10^{-0,1}$ Па. Для измерения вакуума в области $1-10^{-4}$ Па находят широкое применение тепловые вакуумметры, а для измерения вакуума в пределах до 10^{-6} Па применяются ионизационные вакуумметры. Переменные давления в пределах 100 кПа, например в цилиндрах двигателей внутреннего сгорания, где давления пульсируют с высокой частотой, измеряют пьезоэлектрическими манометрами.

Развитие полупроводниковой техники и микроэлектроники открыло новые возможности для создания более совершенных электрических манометров с использованием полупроводниковых тензорезисторов, позволяющих измерять давление в широких диапазонах. Действие приборов этой группы основано на свойстве некоторых материалов изменять свои электрические параметры под действием давления.

Тепловые вакуумметры. Принцип действия тепловых вакуумметров основан на зависимости теплопроводности газовой среды от степени ее разрежения. Две конструкции тепловых вакуумметров: сопротивления и термопарный.

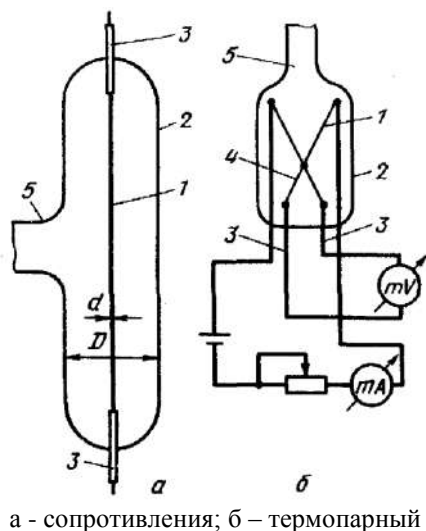


Рисунок 4.3 - Схемы тепловых вакуумметров

В обеих конструкциях чувствительным элементом является нагретая путем пропускания электрического тока платиновая нить 1, расположенная в вакуумном баллоне 2. При увеличении разрежения среды ее теплопроводность будет умень-

шаться,, следовательно, нагретая платиновая нить будет хуже отдавать тепло стенкам баллона, в результате чего ее температура возрастает. Измеряя температуру нити, можно судить о величине вакуума. Чтобы исключить теплопередачу от нити к стенкам баллона за счет лучеиспускания, максимальная температура нити должна быть примерно 100 С. Эти два типа вакуумметра различаются только способом измерения температуры нити. В вакуумметре сопротивления температуру измеряют термометром сопротивления, которым служит сама нить, а в термопарном вакуумметре - термопарой 4. Датчик к измеряемой схеме подключается через электрические вводы 3, а к объекту измерения - через соединительную трубку 5.

В вакуумметрах с термосопротивлением измерение температуры нити и ее нагрев путем пропускания электрического тока осуществляются при помощи мостовой схемы, в одной из плеч которой включена нить вакуумметра. Температура нити измеряется милливольтметром, установленным в диагональ моста. Во второй диагонали находится источник питания моста постоянным током.

В термопарных вакуумметрах температуру нити накала измеряют хромель-копелевой термопарой, которая соединена с нитью при помощи крючка из тонкой проволоки.

Пьезоэлектрические манометры. Пульсирующие с высокой частотой давления измеряют с помощью манометров, построенных на использовании пьезоэлектрических эффектов. Под пьезоэлектрическим эффектом понимают появление электрических зарядов на поверхности некоторых кристаллических диэлектриков при их деформации.

Чувствительным элементом в пьезоэлектрических манометрах, преобразующим механические напряжения в колебания электрического тока, являются пластины из кварца, титаната бария или керамики типа ЦТС (цирконат-титанат свинца).

Датчик пьезоэлектрического дифференциатора давления, предназначенного для непрерывного преобразования скорости изменения давления (нарастания или падения) по линейному закону в унифицированный сигнал 0-5, 0-20, 4-20 мА.

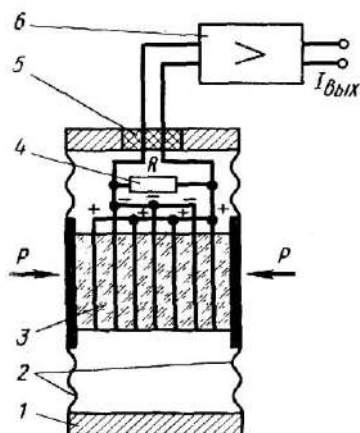


Рисунок 4.4 - Принципиальная схема дифференциатора давления пьезоэлектрического типа

Измеряемое давление через мембраны 2 воздействует на столбик 3, выполненный из пьезокварцевых элементов. В результате появления прямого пьезоэффекта на границах пьезоэлементов возникают положительные и отрицательные заряды, которые снимаются электродами и стекают через сопротивление 4. При постоянной скорости изменения давления между притоком и оттоком зарядов устанавливается равновесие и через резистор 4 протекает постоянный ток, величина которого связана линейной зависимостью со скоростью изменения давления. Напряжение с сопротивления 4 поступает через герметичный вывод 5 в корпусе 1 датчика на усилитель 6 и преобразуется в выходной унифицированный сигнал.

Заряды, возникающие на пьезоэлементах, не могут сохраняться длительное время из-за утечек в элементах измерительной схемы, в связи с чем этот метод применяют для измерения быстро меняющихся давлений (0,1-0,25 МПа/с). Время установления выходного сигнала 1-2 с; допускаемая основная погрешность $\pm 10\%$.

Тензометрические манометры. Тензометрический метод измерения давления заключается в непосредственном преобразовании деформации упругого чувствительного элемента (мембраны) под воздействием давления в изменение электрического сопротивления резисторов, закрепленных на этом элементе. Это изменение сопротивления преобразуется электрической измерительной схемой в электрический выходной сигнал, пропорциональный величине измеряемого давления.

Резистор, сопротивление которого изменяется в зависимости от его деформации, называется тензорезистором. Зависимость изменения электрического сопротивления ΔR тензорезистора от давления P определяется по формуле

$$\Delta R = K \epsilon p,$$

где k - коэффициент тензочувствительности.

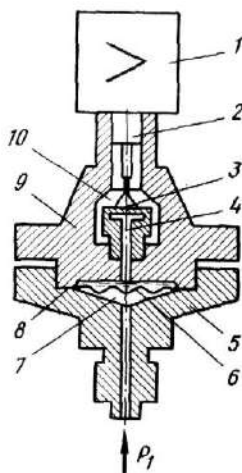


Рисунок 4.5 – Схема преобразователя тензометрического манометра

Мембранный преобразователь размещен внутри основания 9. Внутренняя полость 4 тензопреобразователя 3 заполнена кремнийорганической жидкостью и отделена от измеряемой среды металлической гофрированной мембраной 6, которая приварена по наружному контуру к основанию 9. Полость 10 сообщена с окружающей атмосферой. Измеряемое давление подается в камеру 7 фланца 5, снабженного уплотняющей прокладкой 8, воздействует на мембрану 6 и через жидкость - на мембрану тензопреобразователя. В качестве чувствительного элемента последнего используется пластина из монокристаллического сапфира с кремниевыми пленочными тензорезисторами. Воздействие измеряемого избыточного давления (или разрежения) вызывает прогиб мембраны тензопреобразователей и изменение сопротивления тензорезисторов. Электрический сигнал от тензопреобразователя измерительного блока передается в электронное устройство 1 с помощью проводов, проходящих через герметичный вывод 2.

Питание преобразователя осуществляется стабилизированным напряжением постоянного тока 36 В.

Верхний предел измеряемого избыточного давления до 100 МПа, разрежения - до 100 кПа, давления-разрежения - от $(-0,125) \div (+0,125)$ Па до $(-0,1) \div (+2,4)$ МПа. Малые габариты, простота устройства, высокая точность (предел допускаемой основной погрешности составляет $\pm 0,25-1,0\%$) и надежность в работе предопределили их широкое использование в сложных условиях металлургического производства.

4.5 Дифференциальные манометры

Дифференциальные манометры применяются для измерения разности (перепада) давления жидкостей и газов. Дифманометры могут быть использованы для контроля расхода газа или жидкости по перепаду давления в сужающем устройстве, для измерения уровня жидкости, находящейся под атмосферным, избыточным или вакуумметрическим давлением, а также для измерения малых избыточных и вакуумметрических давлений в качестве тягомеров, напоромеров и тягонапоромеров.

Верхний предел измерений перепадов давлений дифманометров выбирают из ряда $A = a \cdot 10^n$, где a - одно из чисел ряда 1; 1,25; 1,6; 2; 2,5; 3,2; 4; 5; 6,3; 8; n - целое число (положительное или отрицательное) или нуль.

Классы точности выбирают из ряда 0,5; 1; 1,5; 2,5. Класс точности 2,5 допускается только для дифманометров с верхним пределом измерений < 100 Па.

По принципу действия и конструктивным признакам дифманометры разделяют на следующие типы: двухтрубные, кольцевые, поплавковые, колокольные, мембранные и сильфонные. Двухтрубные, кольцевые и поплавковые дифманометры, в прошлом широко распространенные в промышленности, в настоящее время применяются редко, и их изготовление существенно сокращено из-за недостатков, обусловленных главным образом наличием в них рабочей жидкости, особенно ртути. Ниже рассмотрены дифманометры, наиболее широко применяемые в металлургии.

Колокольные дифманометры. Колокольные дифманометры являются бесшкальными первичными измерительными приборами, предназначенными для измерения тяги, напора и разности давлений неагрессивных газов при низких статических давлениях.

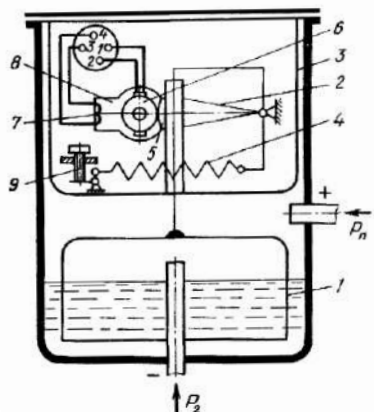


Рисунок 4.6 – Принципиальная схема колокольного дифманометра

Чувствительным элементом прибора является колокол 1, частично погруженный в трансформаторное масло. Колокол подвешен к рычагу 2, расположенному в бачке 3. Перепад давления, воспринимаемый колоколом, уравнивается пружиной 4. Под действием этого усилия колокол перемещается вверх или вниз. При перемещении колокола поворачивается сектор 5, жестко связанный с рычагом 2. Сектор сцеплен с шестеренкой 6, сидящей на оси рамки 7 ферродинамического преобразователя 8. Угол поворота рамки, а следовательно, и ее э.д.с. пропорциональны разности давлений, действующих на колокол. Винт 9, воздействующий на измерительную пружину 4, служит для установки рамки преобразователя в нулевое положение. Для устранения потерь на трение бачок с механическими деталями заполнен трансформаторным маслом.

Колокольные дифманометры выпускаются с диапазоном напора 40-400 Па тягонапора $\pm 32 \div \pm 200$ Па, на предельные номинальные перепады давлений 0,1; 0,16; 0,25; 0,4; 0,63; 1 кПа. Предельно допустимое рабочее избыточное давление на дифманометр 0,25 МПа. Дифманометры работают в компенсационных измерительных ферродинамических схемах в комплекте со вторичными приборами, настроенными на входной сигнал 1-0-1 В, 50 Гц, или соответствующую ему взаимдуктивность 10-0-10 мГ.

Мембранные дифманометры. Мембранные дифманометры являются бесшкальными первичными измерительными приборами, предназначенными для измерения давления и перепада давления неагрессивных сред и преобразующими измеряемую величину в унифицированный аналоговый сигнал постоянного тока 0-5 мА (0-20 мА), переменного тока взаимной индукции 0-10 мГ или в пневматический сигнал давлением 20-100 кПа.

Схема мембранного дифманометра ДМ с дифференциально-трансформаторным преобразователем.

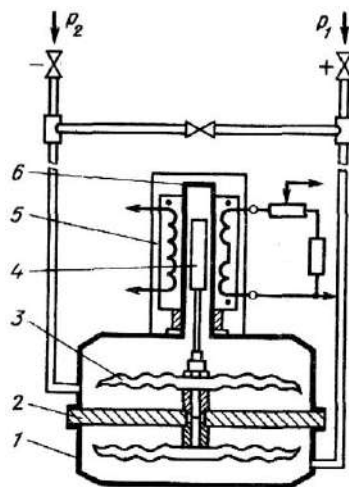


Рисунок 4.7 – Схема мембранного дифманометра

Чувствительным элементом дифманометра является мембранный блок, состоящий из двух мембранных коробок 1 и 3, закрепленных в корпусе 2. Мембранные коробки изготовлены из гофрированных мембран, выполненных из коррозионностойкого немагнитного хромоникелевого сплава. Внутренние полости мембранных коробок заполнены дистиллированной водой, и через отверстие в перегородке коробки сообщаются между собой. С центром верхней мембраны связан сердечник 4 дифференциально-трансформаторного преобразователя 5. Сердечник перемещается внутри разделительной трубки 6, изготовленной из немагнитной стали.

Давления P_1 и P_2 в камеры дифманометра подводятся трубками через два запорных вентиля. Большее давление P_1 подается через вентиль, обозначенный знаком плюс, меньшее давление P_2 - через вентиль, обозначенный знаком минус. Для сообщения между собой плюсовой и минусовой камер служит уравнивающий вентиль, расположенный ниже запорных вентилях. Под действием измеряемой разности давлений нижняя мембранная коробка сжимается и жидкость из нее перетекает в верхнюю коробку, вызывая перемещение центра мембраны верхней коробки, а вместе с ней и сердечник, дифференциально-трансформаторного преобразователя до тех пор, пока усилие от приложенной к мембранному блоку разности давлению не уравновесится упругими силами мембранных коробок. Перемещение сердечника приводит к изменению напряжения выходного сигнала пропорционально измеряемому перепаду давления. Дифманометры типа ДМ выпускаются на предельные перепады давления от 1 кПа до 1,6 МПа и работают в комплекте со вторичными приборами, настроенными на выходной параметр 0-10 мГ.

К разновидности мембранных дифманометров можно отнести приборы с тензометрическими преобразователями.

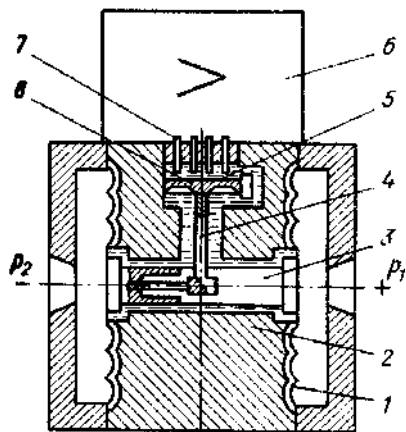


Рисунок 4.8 - Схема тензометрического преобразователя перепада давления

Тензопреобразователь 4 мембранно-рычажного типа размещен внутри заполненной кремнийорганической жидкостью полости основания 2 и отделен от контролируемой среды металлическими гофрированными мембранами 1. Данные мембраны по наружному контуру приварены к телу основания и соединены между собой центральным штоком 3, связанным, в свою очередь, с концом рычага тензопреобразователя, в качестве чувствительного элемента которого используется пластина из монокристаллического сапфира с кремниевыми пленочными тензорезисторами. Воздействие разности давлений вызывает прогиб мембраны 1, изгиб мембраны 8 тензопреобразователя и изменение сопротивления тензорезисторов 5. Электрический сигнал с тензомодуля передается из полости высокого давления в электронное устройство 6 по проводам через герметичный вывод 7. Измерительный блок выдерживает без разрушения воздействие односторонней перегрузки рабочим давлением. Это обеспечивается тем, что при односторонней перегрузке мембрана 1 после дополнительного перемещения ложится на профилированную подушку.

Стандартный выходной сигнал преобразователя 0-5, 0-20 или 4-20 мА постоянного тока.

Сифонные дифманометры. Схема сифонного дифманометра с магнитным преобразователем.

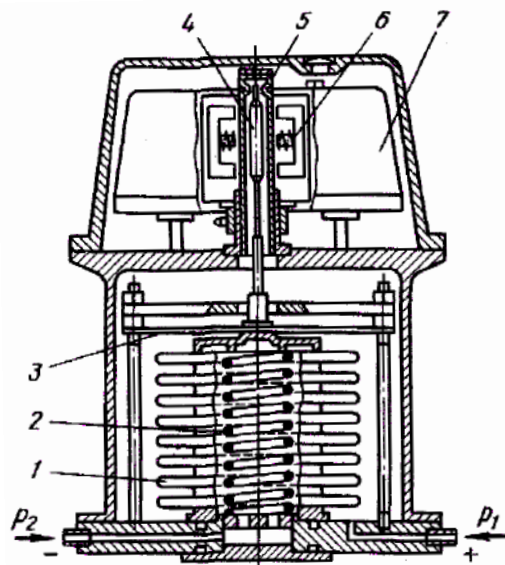


Рисунок 4.9 - Сифонный дифманометр

Измерительный блок дифманометра состоит из сифона 1, в который встроена винтовая пружина 2. Жесткость пружины определяется диапазоном измеряемого перепада давления. Сифон жестко соединен с плоской пружинной подвеской 3, с которой при помощи немагнитного штока связан магнитный сердечник 4. Сердечник находится внутри разделительной трубки 5 из немагнитной коррозионностойкой стали. На разделительной трубке установлен преобразователь с магнитной компенсацией 6. Рядом с преобразователем расположен транзисторный усилитель 7. Подвод давлений P_1 и P_2 в камеры дифманометра осуществляется через импульсные трубки. Под воздействием разности давлений ($P_1 - P_2$) сифон 1 сжимается, вызывая перемещение его дна. При этом перемещается жестко связанный с сифоном шток преобразователя, выходной сигнал которого дополнительно усиливается транзисторным усилителем и в виде унифицированного сигнала 0-5 мА поступает ко вторичному прибору.

Сифонные дифманометры выпускаются на предельные перепады давления 6,3- 630 кПа и рассчитаны на предельно допускаемое рабочее давление (избыточное) 25 кПа.

5. Измерение расхода и количества газов, жидкостей и пара

5.1 Классификация методов измерения расхода и количества

Измерение расхода и количества жидкостей, газа и пара, связанное с оперативным контролем, регулированием и управлением технологическими процессами в промышленности, является определяющим звеном при оценке эффективности работы агрегата и предприятия в целом. В практике металлургической теплотехники наиболее часто требуется определение объемных или массовых количеств G_V (кг), G_M (кг) и расходов вещества Q_V (м³/с); Q_M (кг/с).

Количество вещества, прошедшее за определенный промежуток времени, определяют изменением значения, измеренного в единицах определяемой физической величины. Расход вещества устанавливают величиной количества вещества в единицу времени. Приборы, измеряющие количество вещества, протекающее через поперечное сечение трубопровода за определенный промежуток времени, называют счетчиками количества. Количество вещества определяется в них разностью показаний счетчика в начале и конце этого промежутка времени.

Расходомерами называют приборы, определяющие количество вещества, протекающее через поперечное сечение трубопровода в единицу времени. Расход иногда определяют по показаниям счетчиков как средний между двумя отсчетами. Имеются расходомеры со счетчиком, которые позволяют одновременно измерять расход и количество вещества.

Наиболее информативным является измерение массового расхода, так как объемный расход зависит от условий измерений и параметров измеряемой среды. Между объемными и массовыми величинами существует зависимость, определяемая соотношениями: $Q_M = \rho Q_V$, $Q_M = G_M / \tau$; $Q_V = G_V / \tau$ где τ - интервал времени измерения; ρ - плотность измеряемой среды.

Сопоставимость результатов измерения расхода в условиях изменяющихся параметров среды обеспечивают приведением рабочих условий измерения к нормальным. В этом случае расход называют объемным расходом, приведенным к нормальным условиям. В промышленной практике нормальными условиями считаются температура $t_H = 20$ °С, давление $P_H = 101325$ Па и относительная влажность $\phi = 0$.

Помимо деления всех устройств для измерения вещества на два больших класса объемных и массовых измерителей, представленных счетчиками и расходомерами, существует классификация их методов измерения по тем физическим законам, которые лежат в основе принципа действия этих устройств. Существуют устройства, реализующие следующие методы измерения: метод переменного и постоянного перепада давления (дросселирующие устройства и расходомеры обтекания); метод скоростного напора (напорные трубки); переменного уровня (щелевые расходомеры); электромагнитные; тепловые; тахометрические; инерциальные; ультразвуковые; оптические; маркерные и другие методы.

Общая классификация методов и средств измерения расхода и количества газов, жидкостей и пара, выполненная на основе учета их принципа действия представляется следующим образом:

- расходомеры переменного перепада давления, первичным преобразователем информации у которых является сужающее устройство, гидравлическое со-

противление, напорное устройство, центробежный и струйный преобразователь. Принцип действия преобразователей с сужающим, напорным устройством и гидравлическим сопротивлением основан на зависимости величины перепада статического давления, возникающего в преобразователе, от расхода. Центробежные преобразователи реализуют принцип изменения давления, возникающего на закруглении трубопровода, от расхода. Струйные реализуют принцип изменения перепада давления, образующегося при ударе струи, от расхода;

- расходомеры переменного уровня, принцип работы которых основан на зависимости уровня в расходомере при свободном истечении среды через отверстие от расхода;

- расходомеры обтекания, основанные на зависимости положения чувствительного элемента, воспринимающего динамическое давление потока, от расхода;

- тахометрические расходомеры, реализующие зависимость скорости движения чувствительного элемента расходомера, установленного в потоке, от расхода. Эта группа включает: объемные (камерные) расходомеры, отмеряющие при движении определенные объемы среды (шестеренные, поршневые, роторные, винтовые, турбинные и шариковые);

- электромагнитные расходомеры, реализующие зависимость взаимодействия электропроводной среды с магнитным полем от расхода;

- ультразвуковые расходомеры, основанные на зависимости частоты колебаний от расхода;

- вихревые расходомеры, принцип работы которых связан с зависимостью частоты колебаний при вихреобразовании в потоке от расхода;

- тепловые расходомеры, преобразующие с помощью теплового преобразователя скорость потока в температуру и использующие зависимость этой температуры от расхода;

- оптические расходомеры с лазерным преобразователем, принцип действия которых реализует зависимость скорости прохождения светового пучка от расхода среды;

- ионизационные расходомеры используют искусственную ионизацию потока среды и измеряют ионизационный ток, величина которого зависит от расхода среды;

- меточные расходомеры реализуют зависимость времени прохода искусственно созданной внутри потока метки участка трубопровода от расхода. В зависимости от способа введения метки в поток различают радиоактивные, ионизационные, химические, тепловые, магнитные, оптические, ядерно-магнитные и другие меточные расходомеры.

Основные термины, понятия и определения в области измерения расхода и количества устанавливаются ГОСТ 15528-70.

5.2 Тахометрические, скоростные и объемные устройства для измерения расхода и количества

Тахометрический метод нашел широкое применение для измерении расходов холодной и горячей воды, кислот, щелочей, жидких продуктов нефтеперегонки, газов и других веществ, химически не действующих на рабочие части приборов. В

методе используется тахометрический преобразователь расхода, в котором скорость движения чувствительного элемента, взаимодействующего с потоком, зависит от расхода вещества. Момент на подвижной части этих устройств создается за счет кинетической энергии самого измеряемого потока. Классификация тахометрических устройств по виду рабочей (чувствительного) элемента.

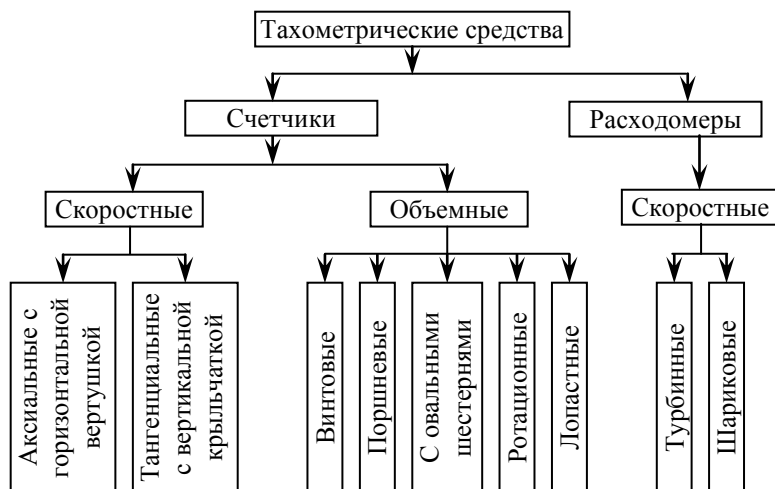


Рисунок 5.1 – Тахометрические средства измерения расхода и количества

Скоростные счетчики. Измерители расхода этого типа применяют для измерения суммарного количества жидкости (в основном воды) при температурах до 90 °С и давлениях до 1-1,6 МПа. Принцип действия основан на суммировании числа оборотов помещенного в поток вращающегося чувствительного элемента за определенный промежуток времени. В качестве рабочего элемента в скоростных счетчиках применяют вертикальные (аксиальные) или горизонтальные (тангенциальные) вертушки (турбинки). Частота вращения вертушки пропорциональна средней скорости потока, а следовательно, и объемному; расходу. Число оборотов суммируется счетным механизмом, а количество жидкости в единицах объема указывается счетным устройством.

Счетчики количества характеризуются следующими параметрами: калибром - условным проходным диаметром входного патрубка; пределами допускаемой основной погрешности (% от действительного количества жидкости); потерей давления, вызываемой прибором; начальным, номинальным и верхним пределами измерений; порогом чувствительности; емкостью счетчика - наибольшим значением количества жидкости, показываемым счетным механизмом; предельно допускаемым избыточным давлением и предельной температурой измеряемой среды.

Погрешность счетчиков зависит в основном от вязкости, температуры и расхода среды и определяется экспериментально. Следует учесть, что потеря статического давления, вызываемого счетчиком, возрастает с увеличением расхода и вязкости и является критерием его пропускной способности.

Нижним пределом измерения считается тот наименьший расход, при котором погрешность показаний прибора не превышает допустимую, а эксплуатационным – наиболее длительный расход, при котором погрешность также не выходит за пределы допускаемой и прибор выдерживает длительный срок эксплуатации. Номинальный расход принимается равным половине максимального, в качестве которого устанавливается величина расхода, допускающего работу прибора с ограниченным сроком (1-2 ч/сут).

Скоростные счетчики бывают крыльчатые и турбинные. Они имеют одинаковые по назначению узлы и кинематическую схему, но отличаются типом чувствительного элемента (вертушка, установленная перпендикулярно потоку, и турбинка с аксиальным расположением в потоке). При работе прибора вращение оси крыльчатки (турбинки) передается через редуктор и магнитную муфту счетному механизму, имеющему индикатор показаний в виде счетчика.

Счетчики с крыльчатым рабочим органом в зависимости от размещения счетного механизма подразделяются на два типа: "мокроходы" (счетный механизм расположен непосредственно в жидкости) и "сухоходы" (счетный механизм отделен соответствующим устройством). Первые имеют более простую конструкцию, но их эксплуатация возможна лишь в чистых жидкостях. Кроме того, в зависимости от способа подвода жидкости к крыльчатке эти счетчики делятся на одноструйные и многоструйные. Одноструйные имеют меньшие потери давления, так как измеряемая среда протекает по счетчику по кратчайшему пути без образования "застойных" зон.

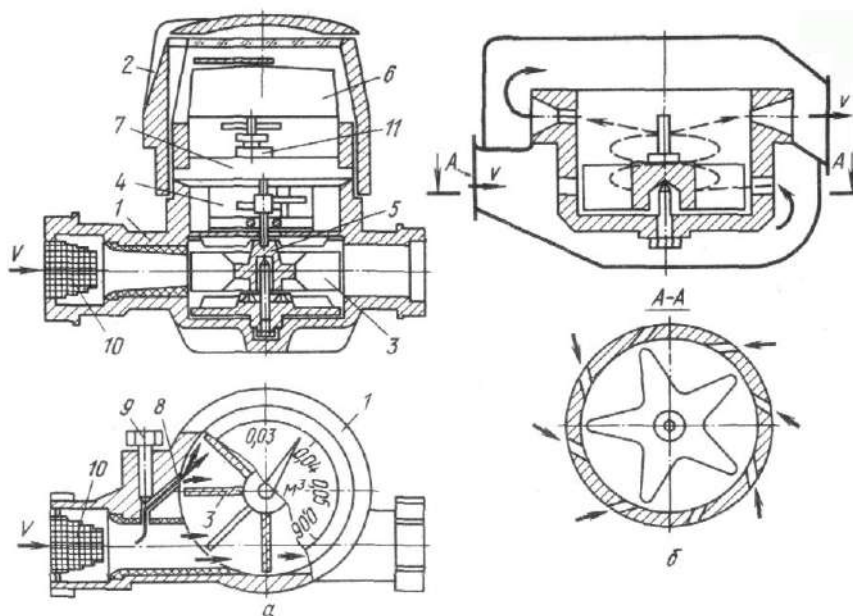


Рисунок 5.1 – Скоростные крыльчатые счетчики

Конструкция такого одноструйного "сухохода" состоит из корпуса 1; кожуха 2 с откидной крышкой, крыльчатки 3 звездообразной формы, вращающейся на вертикальной оси с агатовой точечной опорой; редуктора 4, соединяемого через магнитную муфту 5, одна половина которой находится в сухой части счетчика, а другая в мокрой; со счетным механизмом 6, имеющим циферблат с роликовым и стрелочным указателями.

Счетный механизм отделен от редуктора немагнитной герметичной перегородкой 7. Счетчик снабжен регулятором для тарировки прибора. Для этого во входном патрубке имеется канал 8, соединяющий полость патрубка с камерой крыльчатки таким образом, что поступающая из него жидкость тормозит вращение крыльчатки. Винтом 9 перекрывается проходное сечение канала (уменьшается или увеличивается тормозящее действие), чем и достигается регулирование оборотов крыльчатки, необходимое при тарировке прибора. Вода из трубопровода поступает через фильтр 10 на лопатки крыльчатки и приводит ее во вращение и посредством редуктора и муфты 11 передает его счетному механизму, по показаниям которого определяется количество протекающей жидкости.

В многоструйном датчике жидкость поступает в нижнюю часть корпуса через ряд отверстий и несколькими струями попадает на лопатки крыльчатки, вращая ее. Спиралеобразным движением жидкость затем поднимается вверх вдоль оси и через верхние отверстия удаляется в выходной патрубок.

В турбинных счетчиках движущийся поток вращает турбинку, представляющую собой многоходовой (4-6 заходный винт) с большим шагом. Частота вращения n винта пропорциональна средней скорости потока v_{cp} и обратно пропорциональна шагу лопасти k

$$n = c v_{cp} / k ,$$

где c - постоянная счетчика.

Средняя скорость v_{cp} связана с объемным расходом Q_0 жидкости и площадью проходного сечения F формулой $v_{cp} = Q_0 / F$. Подставив это выражение в формулу, получим

$$Q_v = n F k / c ,$$

т.е. расход пропорционален частоте вращения турбинки.

На точность показаний этих приборов значительное влияние оказывает направление (параллельность оси вертушки) потока, так как малейшие завихрения его в зоне вертушки сказываются на частоте вращения винта.

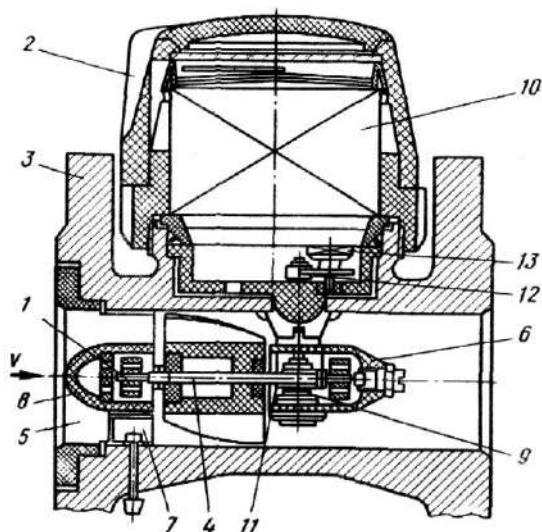


Рисунок 5.3 - Схема аксиального счетчика

Устройство скоростного аксиального счетчика состоит из измерителя скорости потока 1 и счетной головки 2. Измеритель скорости имеет корпус 3, турбинку с осью и червяком 4, струевыпрямитель 5, кронштейн 6 и регулятор 7. Корпус имеет фланцы для присоединения к трубопроводу и горловину для установки счетной головки. Струевыпрямитель, предназначенный для выпрямления потока, попадающего на лопасти, помещается перед турбинкой. Там же располагается передняя радиальная опора 8 оси турбинки. Торцовая регулируемая опора 9 размещена в кронштейне 6 и выполнена в виде винта с закрепленным в торце корундовым камнем.

Регулятор 7 используется при тарировке счетчика. Поворот пластины регулятора отклоняет в ту или другую сторону часть потока, что замедляет или ускоряет вращение турбинки. Счетная головка 2 на весь ряд турбинных счетчиков единая, унифицированная и подобно крыльчатому счетчику состоит из редуктора и счетного механизма т. Связь турбинки со счетным механизмом осуществляется через червячную 11 и цилиндрическую пары 12, а также магнитную муфту 13.

Счетчики этого типа устанавливают на горизонтальных участках трубопроводов, имеющих прямые участки перед счетчиком длиной более пяти, а за ним — один-два диаметра трубопровода.

Крыльчатые счетчики выпускают на расходы $0,05-1,5 \text{ м}^3/\text{ч}$ с диаметром условного прохода 20-50 мм, а турбинные — на расходы $1,5-175 \text{ м}^3/\text{ч}$ при диаметре условного прохода 50-180 мм. Счетчики имеют небольшую потерю давления ($< 0,01 \text{ МПа}$).

Некоторые типы счетчиков, помимо местной шкалы, имеют дистанционную передачу показаний, в виде преобразователя вращения стрелки в импульсный электрический сигнал с помощью магнитоуправляемого контакта, располагаемого под стрелкой и управляемого магнитом, закрепленным на стрелке. Показания передают-

ся в виде число-импульсного кода с ценой деления одного импульса кода 0,05-0,5 М³.

Объемные счетчики и расходомеры. Объемные счетчики, обладающие большей точностью, чем скоростные, применяют для измерения веществ с повышенной вязкостью (до 300 сСт) и более высокой температурой (до 170 °С). Расход протекающей жидкости измеряется отдельными, равными объемами, вытесняемыми из измерительной камеры прибора под действием разности давлений на счетчике. Число пропущенных доз суммируется и индицируется указателем счетного механизма. Счетчики данного типа используются в контурах охлаждения печных агрегатов и системах подачи жидкого топлива с целью контроля и управления технологическими режимами печей. К их числу относятся: поршневые, винтовые, с овальными шестернями, лопастные, ротационные и т.п.

В металлургии применяются мазутомеры поршневого типа. Существуют конструкции устройств, используемые в качестве счетчика-расходомера топлива со встроенным суммирующим устройством и дистанционной передачей показаний.

Расходомер имеет четырехпоршневой гидромотор и тахометрическую головку. В гидромоторе четыре поршня, тесно связанные со штоками, перемещаются в мерных цилиндрах под действием разности давлений, действующих со стороны потока на поршни на впуске и выпуске. Штоки с помощью дисков преобразуют прямолинейное движение штока во вращательное движение вала, на котором закреплен кривошип, приводящий в движение клапан. Клапан последовательно соединяет цилиндры с входным и выходным патрубками. При заполнении двух цилиндров поршни в них поднимаются, а в двух диаметрально противоположных опускаются, вытесняя жидкость в выходной патрубок. Ход поршней регулируется установкой диска, а следовательно и объем вытесняемой жидкости определяется числом ходов поршней в цилиндрах и измерительным объемом цилиндров. Вращательное движение вала передается через редуктор на счетный механизм.

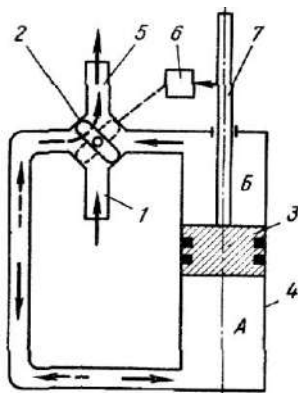


Рисунок 5.4 - Схема работы объемного поршневого расходомера

Принцип действия поршневого расходомера. Жидкость через патрубок 1 и распределительный клапан 2 направляется под поршень 3 в полость А мерного цилиндра 4. Вещество, находящееся в полости Б, вытесняется поршнем и через клапан

2 уходит в патрубок S. При подходе поршня к верхнему положению клапан 2, связанный кривошипным механизмом 6 со штоком поршня 7, перемещаются в положение, указанное пунктиром. Теперь жидкость поступает в камеру Б и из камеры А вытесняется через клапан.

Устройства с дистанционной передачей показаний дополнительно снабжены нормирующим преобразователем, электрический сигнал которого имеет частоту, пропорциональную скорости вращения вала. Частотный сигнал преобразуется в аналоговый 0-5, 0-20 или 4-20 мА постоянного тока.

Счетчики-расходомеры мазута выпускаются на расходы 0,050-4,0 м³/ч и имеют диаметр условного прохода 15-32 мм, класс точности 0,6-2,0. Контролируемая среда должна иметь температуру в пределах 10-120 °С, давление до 2 МПа, допускаемый минимальный расход 15% от максимального. Счетчики имеют большую потерю давления 3-6 % от максимального, что требует предусматривать резерв по давлению при их установке. Счетчики устанавливаются на горизонтальном участке с предварительной фильтрацией измеряемой среды.

Лопастные счетчики. Счетчики лопастного типа предназначены для измерения количества агрессивных и неагрессивных жидкостей с вязкостью от 0,55 до 300 сСт, давлениях 1,0-6,4 МПа и температуре (-40)÷(+60) °С. Пределы измерения номинальных расходов 45-420 м³/ч. Принцип действия основан на том, что поток жидкости, поступающий через входной патрубок в измерительную камеру, теряет часть напора на создание крутящего момента на роторе с выдвижными лопастями.

Измерение объемного количества жидкости происходит путем периодического отсекаания определенных объемов жидкости, заключенных в полости между двумя лопастями и цилиндрическими поверхностями измерительной камеры и барабана. За полный оборот отсекаются четыре объема, суммарная величина которых равна емкости измерительной камеры.

Конструктивно счетчик состоит из измерителя объема и счетного указателя (барабанного цифрового счетчика). Измеритель объема имеет корпус с патрубками для отвода и подвода измеряемой среды, измерительную камеру с крышкой и дном, редуктор и магнитную муфту 2. Измерительная камера 1 является основным узлом прибора. В ней помещены барабан 3 с лопастями 4, ось с кулачком 6, ролики 5.

В крышке измерителя объема установлены редуктор и магнитная муфта. Под воздействием потока вращается барабан с четырьмя лопастями, расположенными в диаметрально противоположных направлениях под углом 90° друг к другу. В приливе каждой лопасти на осях установлены ролики 5, которые при вращении обкатываются по кулачку 6, неподвижно закрепленному на оси. Благодаря этому лопасти совершают возвратно-поступательное движение, отсекая за один оборот строго определенные объемы. Движение барабана через шестерни и магнитную муфту и редуктор передается на цифровые барабаны. Блок сменных шестерен позволяет точно установить показания в соответствии с действительным расходом.

Показания лопастных счетчиков в значительной мере зависят от вязкости среды (изменение, вязкости от 6 до 300 сСт снижает номинальный расход с 70 до 28 м³/ч). Счетчики этого типа снабжаются автоматическим термокорректором и блоком-датчиком дистанционной передачи показаний. Допускаемые пределы изме-

ния 25-150 % от номинального. Класс точности 0,25-0,5. Диаметры условного прохода 100-250 мм.

Шестеренные и ротационные счетчики. Объемные счетчики жидкости с овальными шестернями в настоящее время получили широкое распространение. В измерительной камере 1 под действием разности давлений $\Delta P = P_1 - P_2$ потока свободно вращаются две овальные шестерни 2, приведенные в зацепление друг с другом. В положении I на левой шестерне возникает вращающий момент M , который поворачивает ее, перемещая одновременно и правую до положения II, где уже действуют моменты на обе шестерни. В третьей позиции момент действует лишь на правую шестерню. Таким образом, за один оборот счетчик пропускает четыре измерительных объема Q . Счетное устройство фиксирует обороты одной из шестерен. Вращение шестерен через передаточный механизм, состоящий из магнитной муфты и редуктора, передается роликовому и стрелочному указателям. Роликовый служит для индикации количества, а стрелочный – расхода среды.

Счетчики этого типа измеряют жидкости с вязкостью 0,55-300 сСт, давлением до 6,4 МПа и температурой $(-50) \div (+50) ^\circ\text{C}$. Потеря давления в счетчике не превышает 0,05 МПа и зависит от вязкости среды. Погрешность измерения не превышает $\pm 0,5$ % от действительного количества. Счетчики выпускаются с диаметром условного прохода от 25 до 65 мм и номинальным расходом от 2,2 до 17,0 м³/ч. Они монтируются на горизонтальных и вертикальных трубопроводах с обязательной установкой перед ними фильтров-газоотделителей.

Контроль объемного расхода очищенных неагрессивных горючих газов (природного, смешанного, светильного, пропан-бутана, доменного, генераторного, коксового и др.) осуществляют с помощью счетчиков ротационного типа. Счетчики позволяют измерять расходы в пределах от 40 до 1000 м³/ч с погрешностью менее 2,5 % и работают при давлениях до 6,4 МПа и температуре $(-50) \div (+50) ^\circ\text{C}$. Выпускаются счетчики калибром от 50 до 200 мм.

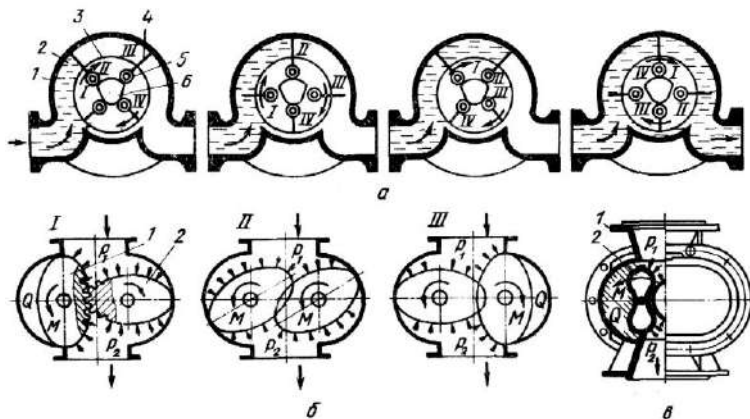


Рисунок 5.5 - Схема работы и устройство лопастного (а), шестеренного (б) и ротационного (в) счетчиков

В корпусе 1 размещены два двухлопастных поршня-ротора 2, имеющих форму восьмерки или овала, передаточный и счетный механизмы. Шестерни роторов находятся в постоянном зацеплении. Принцип действия подобен счетчику с овальными шестернями. Газ поступает через верхний патрубок (указан стрелкой) в корпус прибора, вращает роторы и выходит через нижний патрубок. За один оборот пропускается объем Q , показанный штриховкой. Конец одного из валов связан с редуктором и счетным механизмом. Расход газа пропорционален числу оборотов ротора. Утечки газа между вращающимися роторами и корпусом невелики и зависят от вязкости газа. Ротационные счетчики небольшой пропускной способности монтируются непосредственно на трубопроводах, а остальные – на специальном фундаменте и соединяются фланцами. Перед счетчиками требуется обязательная установка фильтра. Потери давления при номинальном давлении 0,1 МПа составляют 0,3 кПа.

Небольшие количества газов (до $6 \text{ м}^3/\text{ч}$) измеряются барабанными счетчиками или газомерами и счетчиками с мерными мехами и клапанным механизмом газораспределения.

Тахометрические расходомеры. В последние годы весьма перспективными стали турбинные и шариковые тахометрические расходомеры, так как их выходные преобразователи имеют унифицированные сигналы, легко встраиваются в системы автоматического контроля и регулирования и позволяют использовать их в системах с информационными и управляющими машинами. Применение таких преобразователей вместо механических счетчиков и указателей повышает надежность и точность измерений.

Тахометрические приборы относятся к скоростным расходомерам и по принципу действия мало отличаются от обычных скоростных счетчиков. Они изготавливаются в виде роторных устройств с аксиальной или тангенциальной крыльчаткой, вращающейся в потоке, или приборов безроторного типа с шариковым преобразователем. Скорость вращения чувствительного органа в них пропорциональна средней скорости потока. Эти приборы отличаются способом преобразования скорости числа оборотов вертушки в электрический сигнал. Измерение числа оборотов может быть осуществлено электромагнитным I, фотоэлектрическим II, радиоактивным III и другими способами.

Электромагнитные расходомеры получили наиболее широкое распространение и в свою очередь делятся на магнитоиндукционные (а), магнитоэлектрические (б) и индукторные (в).

Магнитоэлектрические расходомеры имеют обмотку 1, помещенную в поле постоянного магнита 2 и крыльчатку 3, выполненную из ферромагнитного материала, которая при вращении циклически изменяет сопротивление магнитной цепи. Это создает в катушке пульсирующую Э.Д.С., по частоте которой судят о скорости вращения крыльчатки.

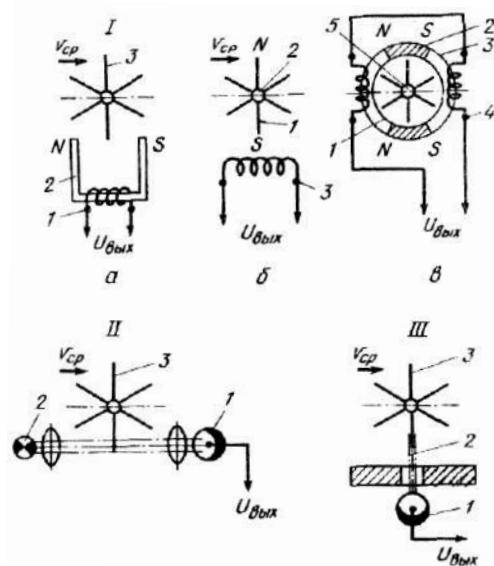


Рисунок 5.6 - Схемы тахометрических преобразователей

Магнитоэлектрические измерители реализуют принцип магнитоэлектрического генератора. При вращении постоянного магнита 1, устанавливаемого в лопастях турбинки 2, периодически меняется магнитный поток и в обмотке 3 наводится э.д.с. с частотой $f = mn / 60$ Гц где m – число пар полюсов; n – скорость вращения ротора, об/с.

В индукционных расходомерах трубопровод 1 охватывается кольцевой магнитной системой, состоящей из двух постоянных магнитов 2 и сердечников 3 из магнитомягкого материала с обмотками. При вращении ротора 5 каждая пара магнитопроводящих лопастей 4 попеременно занимает положение между одной или другой парой полюсов. Вследствие этого направление магнитного потока в магнитопроводе меняется, а в катушках 4 наводится э.д.с, частота которой пропорциональна скорости ротора. Индукционные приборы дают больший сигнал, чем магнитоиндукционные, при одинаковом тормозном моменте на роторе. Наибольший тормозной момент создается в магнитоэлектрическом преобразователе, и они используются только в расходомерах большого калибра.

Фотоэлектрические и изотопные измерители включают приемник 1 и излучатель 2, действующий на приемник с частотой, пропорциональной скорости вращения крыльчатки 3.

Турбинные расходомеры малого калибра (до 200 мм) снабжаются дифференциально-трансформаторными преобразователями.

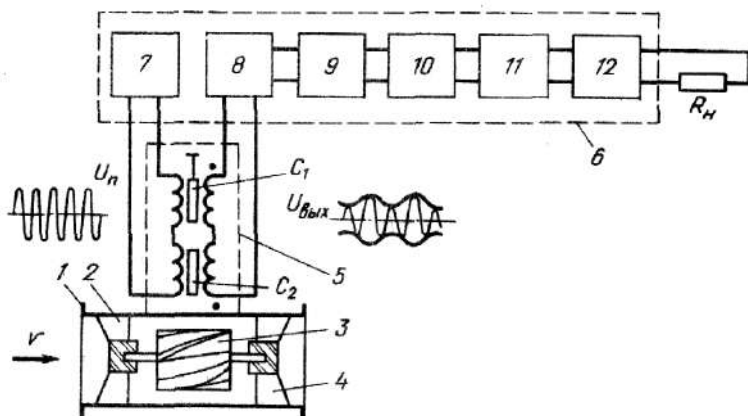


Рисунок 5.7 - Схема турбинного изометрического расходомера

Сам преобразователь заключен в корпус 1, имеющий струевыпрямители 2 и 4, соединенные неподвижной осью, на которой вращается турбинка с винтовыми лопастями 3. Лопасти выполнены из ферромагнитного материала. На наружной поверхности корпуса укреплен передающий дифференциально-трансформаторный преобразователь 5. Импульсный сигнал передающего преобразователя обычно преобразуется в унифицированный выходной сигнал постоянного тока 0-5 мА или постоянного напряжения 0-100 мВ с помощью электронного преобразователя 6, состоящего из генератора 7, усилителя с демодулятором 8, фильтра 9, усилителя низкой частоты 10, мультивибратора 11 и выходного узла 12. В качестве внешней нагрузки (R_n) используются вторичные регистрирующие миллиамперметры, интеграторы или регулирующие приборы.

Преобразователь 5 имеет первичную обмотку, питаемую от генератора переменным током 4-6 кГц, две включенные встречно секции вторичной обмотки и два сердечника C_1 и C_2 . Подвижный сердечник C_1 , позволяет производить регулировку взаимоиндуктивности первичной и вторичной обмотки для подгонки минимальной остаточной э.д.с. датчика в случае, когда лопасть не находится прямо напротив торца сердечника C_2 . В момент прохода ферромагнитной лопасти мимо сердечника C_2 изменяется взаимоиндукция секций первичной и вторичной обмоток и на выходе появляется сигнал переменного тока $U_{вых}$ частотой 3-6 кГц, амплитуда которого выше, чем остаточный сигнал. С выхода модулированный по амплитуде сигнал подается на демодулятор 4 фильтра. Фильтр отсекает несущую частоту, а сигнал с частотой модуляции поступает на усилитель, ждущий мультивибратор, и в выходную часть, где импульсные сигналы преобразуются в унифицированный сигнал постоянного тока 0-5 мА. Приведенная выше схема реализована в турбинном расходомере мазута, работающем под давлением 6,4 МПа и при температуре от 50 до 150 °С. Пределы допускаемой погрешности в диапазоне измерений от 30 до 100 % номинального расхода не превышают ± 2 % при потере давления не более 0,05 МПа.

Шариковые расходомеры. Приборы этого типа имеют преимущество перед роторными вследствие простоты конструкции (отсутствие опорных элементов), высокой эксплуатационной надежности (гарантируется 10000-12000 ч работы при на-

личии твердых механических включений в виде окалины, ржавчины, песка и др. с концентрацией до 40 г/л и размером 1-2 мм, повышенных температур до +500 °С и агрессивных сред).

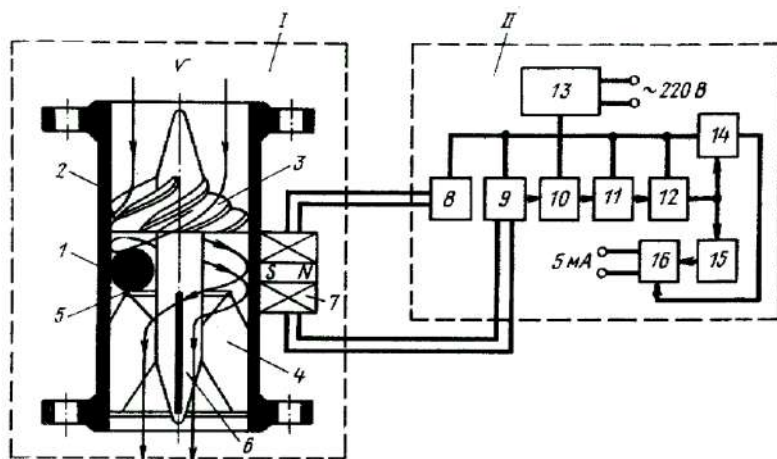


Рисунок 5.8 - Схема тахометрического шарикового расходомера

Расходомер состоит из преобразователя расхода I и нормирующего преобразователя сигнала II. В качестве подвижного элемента применен шарик 1, совершающий под действием закрученного потока планетарное вращательное движение. Для этого в корпусе 2 размещается узел с осевым (иногда тангенциальным) подводом измеряемой среды. Осевой подвод требует закрутки потока с помощью направляющего аппарата 3, выполненного в виде многозаходного винта. При выходе из прибора поток сглаживается струевыпрямителем 4.

На крестовине струевыпрямителя находится ограничивающее кольцо 5, удерживающее шарик 1, выполненный из ферромагнитного материала с пластмассовым или резиновым покрытием, который может свободно вращаться в полости вокруг неподвижной ступицы 6 струевыпрямителя. Жидкость приобретает угловую скорость w , пропорциональную объемному расходу Q_v

$$w = 4Q_v / (\pi n d^2 R) = cQ_v,$$

где d - диаметр входных отверстий, м; n - число отверстий; R - радиус окружности, на которой расположены оси входных отверстий, м.

Скорость вращения шарика регистрируется индуктивным или дифференциально-трансформаторным преобразователем 7, частота наводимых пульсаций сигнала которого пропорциональна объемному расходу среды.

Питание дифференциально-трансформаторного преобразователя осуществляется блоком 8, выходной сигнал которого подается на операционный усилитель 9 нормирующего преобразователя, для фильтрации постоянной составляющей и несущей частоты, возбуждаемой генератором.

Нормирующий преобразователь осуществляет усиление и усреднение входных импульсов, возбуждаемых вращением шара и имеющих частоту, пропорциональную частоте этого вращения. В формирователе 10 и мултивибраторе 11 формируются прямоугольные импульсы постоянной длительности, которые в блоке формирования амплитуды 12 нормируются по амплитуде и с помощью фильтра 15 и генератора тока 16 трансформируются в постоянный аналоговый сигнал 0-5 мА. Питание устройства осуществляется от блока 13, а индикация сигнала - схемой 14.

Шариковые расходомеры выпускают с диаметрами условного прохода от 3 до 150 мм и расходами от 0,025 до 400 м³/ч соответственно. Предельное избыточное давление до 6,4 МПа, температура от 5 до 100 °С. Класс точности не более ±1,5-2,5 %, потери давления - 0,05 МПа.

Винтовые расходомеры. Устройства подобного типа используют для измерения расходов мазута, масел, вязких жидкостей, при температуре 50–125 °С, давлении до 6,4 МПа.

Принцип действия расходомеров основан на учете определенных объемов измеряемой среды, заключенных в полостях между цилиндрическими расточками в корпусе измерителя и ведущим и ведомым винтами. Винты вращаются за счет напора потока, проходящего через полость измерителя. Расходомер состоит из преобразователя расхода и измерительного преобразователя. В преобразователе расхода ведущий винт через редуктор связан с магнитной муфтой, преобразующими частоту вращения винта в импульсы тока с помощью индуктивного датчика.

В измерительном преобразователе происходят усиление сигналов, подсчет числа импульсов в электромеханическом импульсном счетчике количества и измерение расхода в преобразователе "частота–ток". Некоторые типы этих расходомеров снабжены роликовыми указателями суммарного и разового количества или преобразователями выходного сигнала в унифицированный токовый сигнал 0–5 мА. Устройства имеют индукционный преобразователь, в котором магнитные метки, установленные на ведущем винте, возбуждают при вращении импульсы тока, преобразуемые блоком нормирования импульсов в аналоговый сигнал. Индикатором расхода служит цифровой указатель.

Винтовые расходомеры имеют диаметры условного прохода 10-32 мм, номинальные расходы 0,20-16 м³/ч, класс точности 1-2, потери давления 0,1 МПа.

5.3 Измерение расхода методом постоянного перепада давлений

Приборы данного типа используют для измерения расхода перепад давления, возникающий при протекании среды через суженное сечение, причем площадь проходного сечения в них изменяется в соответствии с изменением расхода, а не остается постоянной. Постоянный перепад давления, возникающий в месте сужения, создается чувствительным элементом, изменяющим свое положение в потоке, и определяется, главным образом, весом этого элемента. Поток обтекает чувствительный элемент, и расходомеры постоянного перепада давления называют расходомерами обтекания. К ним относят поплавковые, поршневые расходомеры и ротаметры.

Простейшим из них является поплавковый расходомер, чувствительный элемент которого выполнен в виде поплавка 1, свободно перемещаемого потоком в вертикальном направлении относительно конического седла 2, диаметр и длина ко-

того примерно одинаковы. Подъем поплавка увеличивает площадь проходного сечения F и, следовательно, количество протекающей среды. Высота подъема определяется моментом равновесия противоположно действующих на поплавок сил, а именно: силы тяжести поплавка и сил, определяемых самим движущимся потоком (подъемная сила и трение на стенках). При равенстве этих сил поплавки останавливаются, величина подъема фиксируется преобразователем 3 и передается на регистрирующий прибор 4.

В поршневом расходомере поток свободно входит под давлением P_1 под поршень 2, установленный в корпусе 1, поднимает его и уходит через прямоугольное отверстие F , перекрываемое поршнем. Прямоугольная форма выходного отверстия позволяет получить линейную зависимость величины расхода от высоты подъема поршня. Подъем и условия равновесия поршня определяются равенством сил тяжести поршня G и подъемной силы

$$G = gM = (P_1 - P_2)F,$$

где g - ускорение свободного падения, м/с^2 ; M - масса поршня и движущихся с ним частей, кг ; $\Delta P = P_1 - P_2$ - перепад давлений до и после поршня, Па ; F - площадь поршня, м^2 .

Уравнение показывает, что перепад давлений на этих устройствах в момент равновесия остается постоянным при любом расходе

$$\Delta P = P_1 - P_2 = gG/F = \text{const.}$$

Расходомеры этого типа выпускаются на один условный диаметр проходного сечения равный 50 мм и позволяют измерять расходы вязких жидкостей (60-85 сСт) при давлении не более 1,6 МПа и температуре до 100 °С. Пределы измерения прибора 4 могут быть расширены от 0,5 до 4,0 $\text{м}^3/\text{ч}$ путем изменения массы грузов 3. Погрешность измерения не превышает 2,5 %.

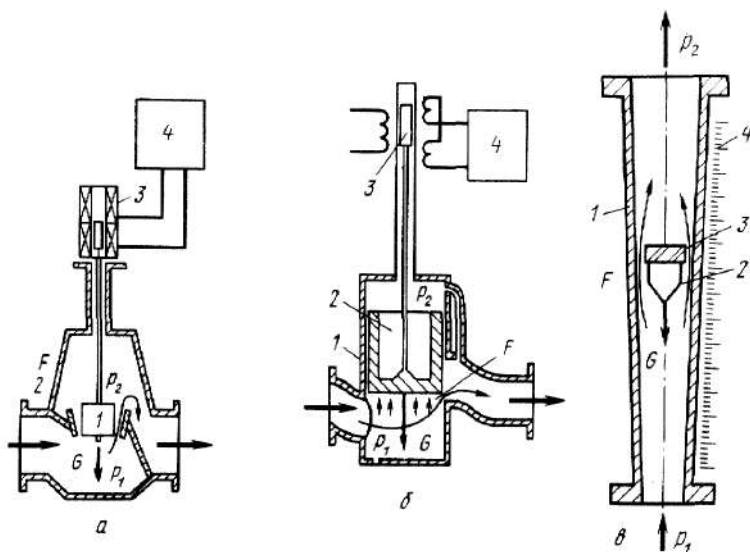


Рисунок 5.9 - Схемы расходомеров постоянного перепада давления

Ротаметр является самым распространенным прибором постоянного перепада давления. Он состоит из длинной вертикально расположенной и расширяющейся вверх конусной трубки 1, внутри которой свободно плавает поплавков 2, изготавливаемый в зависимости от пределов измерения из различных материалов (стали, эбонита, дюралюминия, фторопласта). Центрирование положения поплавка внутри потока достигается применением специальной винтовой насечки 3 на ободке поплавка. Под действием движущегося потока поплавков перемещается в вертикальном направлении и одновременно вращается вокруг своей оси, что и обеспечивает его центрирование в середине потока. Положение поплавка внутри корпуса однозначно связана с расходом и может быть определено непосредственно по шкале 4, нанесенной на корпусе (стеклянный ротаметр), или передается с помощью пневматического или электрического преобразователя на вторичный измерительный прибор.

Схема действия сил, удерживающих поплавков в положении равновесия

Поток, протекающий снизу вверх в конусной трубке, обтекая поплавков, поднимает его до тех пор, пока площадь кольцевого сечения F между поплавком и внутренней поверхностью трубки не достигнет такого значения, когда действующая на поплавков сила тяжести $G_n = g \rho_n V_n$ (V_n - объем поплавка, m^3 ; ρ_n - плотность, kg/m^3 ; g - ускорение свободного падения) не уравнивается силами, действующими снизу на поплавков, а именно, подъемной силой P_n , силой трения $P_{тр}$, возникающей на боковой поверхности поплавка.

Подъемная сила создается за счет разности действующих на поплавков снизу и сверху статических давлений $\Delta P_1 = P'_1 - P'_2$ и определяется как $P_n = \Delta P_1 S$, где S - наибольшая площадь поперечного сечения поплавка, m^2 .

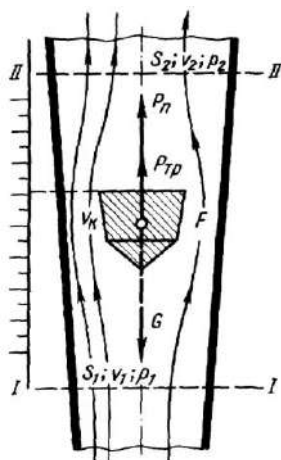


Рисунок 5.10 - Схема работы расходомера постоянного перепада давления

Сила трения равна $P_{тр} = \lambda v_{\kappa} S_{бок}$, λ - коэффициент трения, зависящий от Re и шероховатости поплавка; v_{κ} - средняя скорость потока в кольцевом зазоре между корпусом и поплавком, м/с; $S_{бок}$ - боковая поверхность поплавка, m^2 . Легко показать в этом случае, что $\Delta P_1 = (1/S) (g \rho_{п} V_{п} - \lambda v_{\kappa} S_{бок}) = const$ - величина постоянная и не зависит от расхода.

Строго говоря, разность статических давлений $\Delta P = P_1 - P_2$ в потоке не остается постоянной величиной и не равняется перепаду давлений ΔP_1 на поплавке, так как зависит от изменения динамического и гидростатического давлений, определяемых изменением скорости при разных расходах и разным по высоте положением поплавка. С увеличением расхода сила, действующая на поплавок снизу, возрастает, что вызывает подъем поплавка, а следовательно, увеличение кольцевого зазора между поплавком и стенками корпуса. В результате перепад давления достигает прежней постоянной величины.

Формула расхода для ротаметров выражается сложной зависимостью, определяемой большим количеством параметров

$$Q_v = \alpha F \sqrt{2g V_{п} (\rho_{п} - \rho) / (\rho S)},$$

где α - коэффициент расхода, зависящий от множества факторов - величины конусности трубки, неравномерности распределения скоростей в кольцевом зазоре при обтекании поплавка, потери на местные сопротивления внутри прибора, трения на поплавке и его геометрической формы и размеров, а также ряда других параметров

$$\alpha = 2/k_{п},$$

где g - ускорение свободного падения, м/с^2 ; V_{Π} - объем поплавка, м^3 ; ρ_{Π} и ρ - плотность материала поплавка и протекающей среды, кг/м^3 ; k_{Π} - коэффициент сопротивления поплавка, зависящий от числа Рейнольдса, шероховатости, геометрических размеров и высоты подъема топлива.

Коэффициент расхода α в общем случае зависит от числа Рейнольдса, но имеются области, где α стабилизируется. Этот интервал и определяет допустимую область применения ротаметров. Так как коэффициент расхода α не поддается аналитическому определению, то на практике ротаметры градуируются экспериментально по воде или воздуху, а соответствующие градуировочные характеристики приводятся в паспорте прибора. При этом градуировка справедлива лишь для определенных значений α , ρ и F . В связи с этим шкалы градуируются обычно в относительных единицах расхода, а результат измерения определяется из градуировочной кривой.

Изменение температуры изменяет плотность среды, ее вязкость, а следовательно, влияет на результат измерения. Еще большее влияние оказывается, если ротаметр служит для измерения среды, отличной от применяемой при его градуировке.

Учет изменения условий измерения достигается введением поправочного коэффициента

$$k = (\alpha_1 / \alpha'_1) \sqrt{(\rho_{\Pi} - \rho) \rho_1 / (\rho_{\Pi} - \rho_1) \rho},$$

где α'_1 и ρ_1 - коэффициент расхода и плотность среды, соответствующая градуировочным условиям; α и ρ - действительные значения коэффициента расхода и плотности.

В случае малой вязкости среды и слабой зависимости α от температуры и давления поправочный коэффициент может быть упрощен:

$$k = \sqrt{(\rho_{\Pi} - \rho) \rho_1 / (\rho_{\Pi} - \rho_1) \rho}.$$

В случае газов, у которых ρ мала по сравнению с ρ_{Π}

$$k = \sqrt{\rho_1 / \rho}.$$

Изменение пределов измерения ротаметров осуществляется изменением массы поплавка без изменения его формы и размеров. Расчет ведут, исходя из критерия $(\nu^2 \rho) / M_{\Pi} = \text{const}$, откуда

$$M_{\Pi_2} = M_{\Pi_1} (\nu_2^2 / \nu_1^2) (\rho_2 / \rho_1),$$

где M_{Π_1} - масса поплавка, градуированного на среду с вязкостью ν_1 и плотностью ρ_1 ; M_{Π_2} - масса поплавка для измерения среды с вязкостью ν_2 и плотностью ρ_2 .

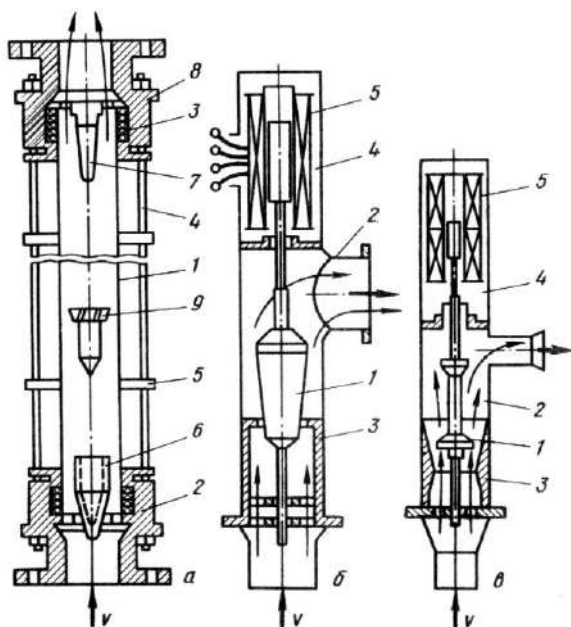
Существует несколько разновидностей конструктивного исполнения ротаметров. Самым простым является предназначенный для местного измерения прозрачных жидкостей и газов ротаметр со стеклянной конусной трубкой 1, которая зажимается концевыми фланцами 2 и 3 с сальниковым уплотнением 8, тягами 4 и распорными перегородками 5. Внутри трубки установлены ограничители хода поплавка 6 и 7. Поплавок 9 имеет винтовую насечку; верхняя грань поплавка служит указателем отсчета шкалы, которая наносится непосредственно на поверхность стеклянной трубки в процентах. Пределы измерения таких ротаметров по воздуху от 0,063 до 40 м³/ч, по воде от 0,0025 до 2,5 м³/ч при наибольшем избыточном давлении до 0,6 МПа и температуре от -30 до +100 °С. Класс точности 2,5-4. Диаметр условного прохода 3-40 мм.

Ротаметры с электрической дистанционной системой передачи показаний и разным способом выполнения чувствительного элемента. Ротаметр с коническим поплавком 1 имеет металлический корпус 2 с диафрагмой 3, внутри которой перемещается поплавок, изменяя проходное сечение диафрагмы, а тем самым и расход среды. Поплавок через тягу связан с сердечником 4 передающего дифференциально-трансформаторного преобразователя 5, выходной сигнал которого используется в схемах контроля и управления.

В ротаметре с грибообразным поплавком 1 внутри металлического корпуса 2 устанавливается конусообразная вставка 3, относительно которой и происходит перемещение поплавка. Через тягу 4 это перемещение передается на систему дистанционного измерения, например преобразователь 5.

Ротаметры последних двух типов выпускаются на повышенные давления до 6,4 МПа и расходом по воде от 0,025 до 16 м³/ч и могут измерять загрязненные и непрозрачные среды при температурах до 70 °С. Потери давления на расходомерах постоянного перепада давления не превышают 0,01 МПа для жидкостей и 0,005 МПа для газов. Диаметр условного прохода от 6 до 100 мм.

Погрешность измерения расхода ротаметрами может быть определена по методике оценки погрешностей косвенных измерений. Наибольшее влияние оказывают погрешности прямых измерений и оценки значений коэффициента расхода α , плотности ρ и геометрических параметров V_{II} , S , F . Относительное влияние этих величин растет в начале шкалы, что является причиной довольно низкого класса точности общепромышленных устройств (~ 2,5). Индивидуальная градуировка позволяет повысить класс точности в 2-3 раза.



а – с конической стеклянной трубкой; б – с коническим поплавком и электрическим преобразователем; в – с грибовидным поплавком

Рисунок 5.11 - Типовые схемы ротаметров

В этом случае суммарная погрешность измерения расхода определяется погрешностью градуировки δ_{Γ} , отсчета показаний δ_{Π} и нелинейностью шкалы $\delta_{\text{ш}}$.

Предельная погрешность градуировки составляет 0,2-0,3 % при среднем квадратическом отклонении результатов 0,18 %. Оценка погрешности δ_{Π} не превышает 1,5-2 % при визуальном отсчете. Погрешность нелинейности $\delta_{\text{ш}}$ определяется непостоянством коэффициента расхода и достигает 0,5-0,6 %. Небольшая суммарная относительная средняя квадратическая погрешность при расходе, составляющем 0,1 максимального, достигает 1,6-2,2 %, а при максимальном расходе 0,5-0,7%.

Вариация плотности измеряемой среды вызывает дополнительную (абсолютную) погрешность $\Delta\rho = \pm(\sqrt{3/2})\sigma_{\rho}\rho_{\Pi}/(\rho_{\Pi} - \rho)$, где σ_{ρ} - среднее квадратическое отклонение значений плотности.

Поверка ротаметров состоит из трех операций (внешнего осмотра, установления работоспособности и определения метрологических характеристик) и проводится на установке, имеющей погрешность, не превышающую 1/3 погрешности ротаметра. Поверка должна проводиться на воде или воздухе с температурой $(20\pm5)^{\circ}\text{C}$ при температуре окружающей среды $(20\pm2)^{\circ}\text{C}$ для класса точности 1,0 или $(20\pm5)^{\circ}\text{C}$ при классе прибора 1,5; 2,5; 4,0.

5.4 Расходомеры с сужающим устройством

Расходомеры с сужающим устройством пригодны для измерения протекающего по трубопроводу вещества при условии заполнения им всего поперечного сечения трубы и установленного в ней сужающего устройства.

При прохождении потока через сужающее устройство происходит изменение потенциальной энергии вещества, часть которой вследствие местного сжатия струи и соответствующего увеличения скорости потока преобразуется в кинетическую энергию. Изменение потенциальной энергии приводит к появлению разности статических давлений (перепада давления), которая определяется при помощи дифманометра. Так как согласно закону сохранения энергии суммарная энергия движущейся среды уменьшается только на величину потерь, то по измеренному перепаду давления может быть определена кинетическая энергия потока при его сужении, а по ней – средняя скорость и расход вещества.

При использовании различных типов сужающих устройств применяются одни и те же исходные уравнения, в которых изменяются лишь значения отдельных коэффициентов и поправочных множителей.

Схема установки в трубопроводе наиболее простого сужающего устройства (диафрагмы) в виде тонкого диска с круглым отверстием посредине и изображение характера потока. Там же дано распределение статического давления P по длине струи ℓ . Сжатие потока начинается перед диафрагмой и благодаря действию сил инерции достигает наибольшей величины на некотором расстоянии за ней, после чего струя вновь расширяется до полного сечения трубопровода. Перед диафрагмой и за ней в углах образуются зоны с вихревым движением, причем зона вихрей после диафрагмы более значительна, чем до нее. Давление струи около стенки трубопровода (сплошная линия) несколько возрастает за счет подпора перед диафрагмой и понижается до минимума за диафрагмой в точке наибольшего сужения струи, где сечение потока меньше, чем отверстие диафрагмы.

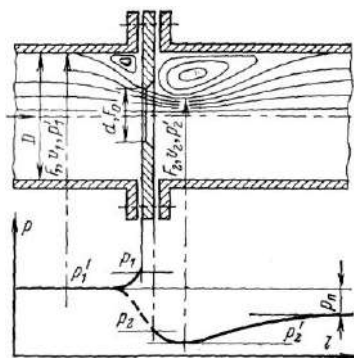


Рисунок 5.12 - Характер потока и распределение статического давления в трубопроводе при установке сужающего устройства.

Далее по мере расширения струи давление около стенки снова повышается, но не достигает прежнего значения на величину p_n ввиду наличия безвозвратных

потерь на завихрение, удар и трение. Изменение давления струи по оси трубопровода практически совпадает с изменением давления около его стенки, за исключением участка перед диафрагмой и непосредственно в ней, где давление потока по оси трубы понижается (пунктирная линия).

Рассмотрим вывод основных зависимостей для определения расхода жидкости при помощи сужающего устройства.

По условию неразрывности струи объемный расход протекающей по трубопроводу жидкости выражается равенством

$$F_1 v_1 = F_2 v_2,$$

где F_1 – площадь наибольшего сечения потока до сужающего устройства, равная площади сечения трубопровода, F_2 – площадь наименьшего сечения потока после сужающего устройства, m^2 ; v_1 и v_2 – средние скорости потока в сечениях F_1 и F_2 , m/c .

Согласно закону сохранения энергии Бернулли для идеальной жидкости

$$\frac{p_1}{\rho_1} + \frac{v_1^2}{2} = \frac{p_2}{\rho_2} + \frac{v_2^2}{2},$$

где p_1 и p_2 – абсолютные статические давления жидкости в сечениях F_1 и F_2 , Па; ρ_1 и ρ_2 – плотности жидкости в сечениях F_1 и F_2 , kg/m^3 .

Плотность жидкости, проходящей через сужающее устройство, практически остается постоянной, т. е. $\rho_1 = \rho_2$. Тогда из уравнения перепад давления жидкости в результате сужения струи

$$p_1 - p_2 = \frac{\rho_2}{2} (v_2^2 - v_1^2).$$

Ввиду того что сечение струи F_2 неизвестно и зависит от размера отверстия сужающего устройства, при подсчетах пользуются так называемым коэффициентом сужения струи μ , выражающимся отношением

$$\mu = \frac{F_2}{F_0},$$

где F_0 – площадь сечения отверстия сужающего устройства, m^2 .

Решая совместно уравнения находим

$$v_1 = \mu v_2 \frac{F_0}{F_1}$$

или, принимая для отношения площадей обозначение $m = F_0/F_1$

$$v_1 = \mu v_2 m.$$

Подставляя это значение v_1 в уравнение и решая последнее относительно v_2 , будем иметь

$$v_2 = \frac{1}{\sqrt{1-\mu^2 m^2}} \sqrt{\frac{2}{\rho_1} (p_1' - p_2')}.$$

Это уравнение не учитывает неравномерного распределения скоростей по сечению потока, обусловленного влиянием вязкости и трения реальной жидкости в трубопроводе, вследствие чего действительная средняя скорость жидкости всегда меньше теоретической. Помимо этого при определении расхода вместо давлений p_1' и p_2' более удобно измерять давления p_1 и p_2 непосредственно до и после сужающего устройства в углах около его торцов. Эти давления соответственно больше величин p_1' и p_2' .

Учитывая замену теоретических условий течения практическими и переход от давлений p_1' и p_2' к давлениям p_1 и p_2 поправочным коэффициентом ζ , получаем

$$v_2' = \zeta v_2$$

где v_2' — действительная средняя скорость потока в сечении F_2 , м/с.

Тогда

$$v_2' = \frac{\zeta}{\sqrt{1-\mu^2 m^2}} \sqrt{\frac{2}{\rho_1} (p_1 - p_2)}.$$

Объемный расход жидкости $Q'_{об}$ (м³/с) может быть найден по уравнению

$$Q'_{об} = F_2 v_2'.$$

Подставляя в это выражение значения F_2 и v_2' из уравнений и учитывая, что $p_1 - p_2 = \Delta p$, находим

$$Q'_{об} = \frac{\mu \zeta}{\sqrt{1-\mu^2 m^2}} F_0 \sqrt{\frac{2}{\rho_1} \Delta p}.$$

Коэффициенты μ и ζ зависят друг от друга и не могут быть определены аналитически. Поэтому их объединяют в общий, так называемый коэффициент расхода α , который находится опытным путем и имеет выражение

$$a = \frac{\mu \zeta}{\sqrt{1 - \mu^2 m^2}}.$$

Кроме того, при измерении расхода газа или пара происходит расширение среды вследствие понижения ее давления при прохождении через сужающее устройство. Изменение объема протекает в этом случае по адиабатическому закону и учитывается поправочным множителем на расширение ε , определяемым расчетом. Для газа и пара ε меньше единицы, а для жидкости ввиду ее несжимаемости равен единице.

Подставив в формулу величины a и ε и перейдя от секундного расхода $Q'_{об}$ к часовому $Q_{об}$ ($\text{м}^3/\text{ч}$), имеем общий вид уравнения для определения объемного расхода измеряемого вещества

$$Q_{об} = 3600 a \varepsilon F_0 \sqrt{\frac{2}{\rho_1} \Delta p}.$$

В этом уравнении

$$F_0 = 0,785 \cdot 10^{-6} \cdot d^2, \text{ м}^2,$$

где d – диаметр отверстия сужающего устройства при температуре t_1 измеряемого вещества перед сужением, мм.

Заменив в уравнении величину F_0 , после преобразований получаем следующее основное выражение для определения объемного расхода жидкости, газа и пара $Q_{об}$ ($\text{м}^3/\text{ч}$)

$$Q_{об} = 0,004 a \varepsilon d^2 \sqrt{\frac{\Delta p}{\rho_1}},$$

и согласно равенству для определения массового расхода Q_M ($\text{кг}/\text{ч}$)

$$Q_M = 0,004 a \varepsilon d^2 \sqrt{\Delta p \rho_1}.$$

Шкалы промышленных дифманометров-расходомеров или работающих с ними в комплекте вторичных прибором градуируются непосредственно в единицах расхода измеряемого вещества, поэтому значения величин a , ε и ρ_1 , в формулах принимаются постоянными, удовлетворяющими заданным условиям измерения. Тогда выражения для определения расхода принимают вид

$$Q_{об} = A \sqrt{\Delta p};$$

$$Q_M = B \sqrt{\Delta p}.$$

где А и В – постоянные, соответственно равные $0,004a\alpha d^2 \sqrt{\frac{1}{\rho_1}}$ и $0,004a\alpha d^2 \sqrt{\rho_1}$

Расчетные параметры (давление и температура) измеряемой среды обычно указываются в паспорте расходомера. При значительном их отклонении в выражения вводятся поправочные множители. Тогда в общем случае будем иметь

$$Q_{об} = A \frac{\varepsilon'}{\varepsilon} \sqrt{\Delta p \frac{\rho_1'}{\rho_1}};$$

$$Q_m = B \frac{\varepsilon'}{\varepsilon} \sqrt{\Delta p \frac{\rho_1'}{\rho_1}},$$

где ε'' – действительный поправочный множитель на расширение измеряемой среды; ρ_1' – действительная плотность измеряемой среды перед сужающим устройством.

При определении расхода вещества и расчете сужающего устройства характерной величиной является относительная площадь отверстия сужающего устройства m , выражающая отношение площадей проходных сечений сужающего устройства и трубопровода, равная для круглой формы отверстий

$$m = \frac{d^2}{D^2},$$

где D – внутренний диаметр трубопровода при температуре t_1 измеряемой среды перед сужающим устройством, мм.

Измерение диаметра сужающего устройства и внутреннего диаметра трубопровода производится обычно при температуре окружающего воздуха 20°C . Тогда величины d и D (мм) определяются по формулам

$$d = d_{20} k_t';$$

$$D = D_{20} k_t'',$$

где d_{20} и D_{20} – диаметры отверстий сужающего устройства и трубопровода при температуре 20°C , мм; k_t' и k_t'' – поправочные множители на тепловое расширение материала сужающего устройства и трубопровода при температуре t_1 измеряемой среды перед сужающим устройством.

Значения k_t для некоторых металлов в зависимости от температуры.

Таблица 5.1 - Поправочные множители на тепловое расширение металлов

Наименование металла	Температура, °С					
	100	200	300	400	500	600
Сталь 20	1,0010	1,0022	1,0037	1,0051	1,0066	-
Сталь X17	1,0008	1,0019	1,0031	1,0046	1,0062	-
Сталь X18H10T	1,0013	1,0030	1,0048	1,0066	1,0083	1,0101
Бронза	1,0014	1,0032	1,0051	1,0070	-	-

В диапазоне температур от -20 до 60 °С можно принимать $k_t = 1$. Диаметр отверстия сужающего устройства d_{20} должен измеряться с точностью $\pm 0,001d_{20}$.

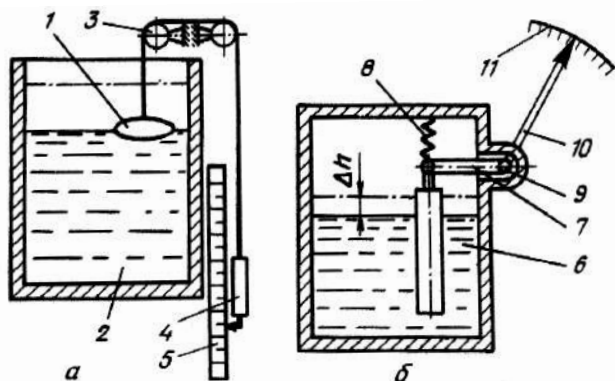
6. Измерение уровня, плотности тепловых потоков и теплоты сгорания топлива

6.1 Уровнемеры для жидких и сыпучих тел

Контроль за состоянием уровня жидкости и сыпучих тел имеет важное значение в технике, особенно в условиях автоматизации технологических процессов в агрегатах с непрерывной подачей и отбором вещества, а также в целях обеспечения безопасной работы оборудования. К таким агрегатам в металлургии принадлежат шахтные печи, установки непрерывного литья, барабаны паровых котлов-утилизаторов и т.д. Так, в доменной печи уровень и профиль поверхности шихтовых материалов под колошником существенно влияют на распределение газовых потоков в шахте печи, а следовательно, и на ход процесса выплавки чугуна.

В зависимости от характера контролируемой среды и условий измерения применяют следующие основные типы уровнемеров: поплавковые, буйковые, гидростатические, емкостные, радиоизотопные, радиоволновые, акустические.

Простейшими и наиболее надежными уровнемерами, применяемыми для контроля уровня жидкости в резервуарах, являются поплавковые. Принцип действия поплавкового уровнемера основан на измерении положения поплавка 1, плавающего на поверхности контролируемой жидкости 2 и связанного через систему подвижных блоков 3 с уравновешивающим грузом - указателем 4, перемещающимся относительно неподвижной вертикальной шкалы 5 при изменении уровня жидкости в резервуаре. Поплавковые уровнемеры применяют, в основном, при небольшом давлении - до 6,0 МПа и температуре измеряемой жидкости до 300 °С. Область измеряемых значений уровня 0,025-20,0 м. Погрешность измерений составляет 1-2 мм.



а) поплавковый уровнемер; б) буйковый уровнемер.

Рисунок 6.1 – Схема устройства уровнемеров

При измерении уровня поплавковыми уровнемерами необходимо учитывать, что изменение плотности контролируемой жидкости приводит к изменению глубины погружения поплавка и к погрешности измерений. Аналогичные последствия

вызывает изменение температуры окружающей среды вследствие изменения объема поплавка. Уменьшение погрешностей измерения уровня, вызванных указанными факторами, достигают уменьшением осадки поплавка путем увеличения площади погружаемой части поплавка или уменьшения его массы.

Буйковые уровнемеры могут работать при значительных давлениях - до 10 МПа. Они в основном применяются для дистанционного измерения уровня жидкости и имеют на выходе унифицированный электрический или пневматический сигнал.

Чувствительный элемент - буюк 6 - закреплен на рычаге 7 и подвешен на пружине 8, при этом буюк частично погружен в контролируемую жидкость, так как в отличие от поплавка он имеет значительный вес. При изменении уровня жидкости в резервуаре на Δh изменяется степень погружения буйка, а следовательно и растягивающее усилие пружины 7 под действием веса буйка. Положение буйка 6 через рычаг 7 и ось 9 преобразуется в угловое перемещение стрелки указателя 10, показывающей по шкале 11 уровень жидкости. Положение буйка может быть преобразовано в электрический или пневматический сигнал для дистанционной передачи.

Буйковые уровнемеры могут применяться для измерения уровня жидкости с плотностями от 0,6 до 2,5 г/см³ при ее температуре от -40 до +400 °С. Класс точности буйковых уровнемеров 1,0 и 1,5. Их чувствительность может быть повышена за счет увеличения площади поперечного сечения буйка 6, а также уменьшения жесткости пружины 8. Причины возникновения погрешностей при измерении уровня в резервуарах буйковыми уровнемерами аналогичны поплавковым уровнемерам.

Гидростатические уровнемеры применяются для измерения уровня жидкостей в барабанах парогенераторов, котлов-утилизаторов и системах испарительного охлаждения металлургических печей. Принцип измерения основан на измерении гидростатического давления, создаваемого контролируемой жидкостью. Существует большое число разновидностей гидростатических уровнемеров, которые можно разделить на два основных типа: дифманометрические и пневмометрические уровнемеры. Схема измерения уровня воды дифманометром в баке с использованием уравнительного сосуда.

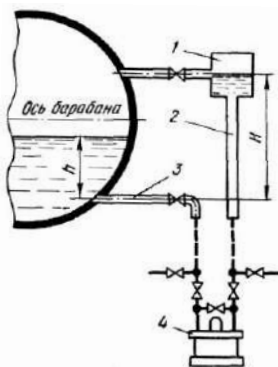


Рисунок 6.2 - Схема измерения уровня воды в барабане дифманометром с использованием уравнительного сосуда

Плюсовая камера дифманометра 4 соединена трубкой 2 с уравнильным сосудом 1, а минусовая камера с нижней частью водяного пространства барабана трубкой 3. В сосуде 1, сообщаемом с паровым пространством барабана, уровень воды (конденсата) поддерживается постоянным. Дифманометры показывают разность гидростатических давлений измеряемого и уравнильного (с постоянным уровнем) сосудов. Уравнильные сосуды данного типа применяют в парогенераторах с давлением пара в барабане $P \leq 16$ МПа. При этом достоверность показаний уровнемера в значительной мере зависит от давления пара в барабане, а также температуры измеряемой среды. Гидростатические уровнемеры применяют для измерения уровня от 0,025 до 6,3 м при температуре контролируемой среды до 600 °С и области изменения давления до 25 МПа. Пределы основной погрешности 1-1,5%.

Пневмометрические уровнемеры применяются для измерения уровня агрессивных жидкостей, в которых гидростатическое давление столба жидкости уравнивается давлением воздуха или инертного газа, измеряемого дифманометром Д.

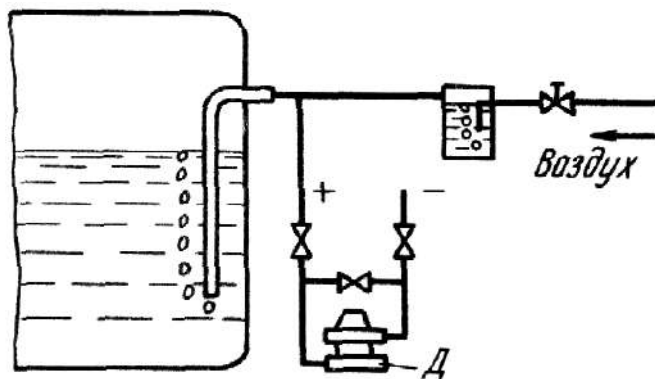


Рисунок 6.3 - Схема пневмометрического уровнемера

Существенным преимуществом пневмометрических уровнемеров является независимость их показаний от температуры соединений.

Емкостные уровнемеры обеспечивают измерение уровня жидкостей переменной плотности в широком интервале температур (от -260 до +250 °С) и давлении до 6,0 МПа. В зависимости от типа они могут применяться для измерения уровня как электропроводящих, так и неэлектропроводящих жидкостей (к первым относят жидкости, имеющие удельное электрическое сопротивление $\rho \leq 10$ Ом·м и диэлектрическую проницаемость $\epsilon_{ж} \geq 7$ Ф/м), в том числе и агрессивных. Принцип действия емкостного датчика основан на измерении электрической емкости первичного преобразователя, изменяющейся пропорционально изменению уровня контролируемой жидкости в резервуаре относительно неподвижного датчика.

Емкостной уровнемер для неэлектропроводящей жидкости.

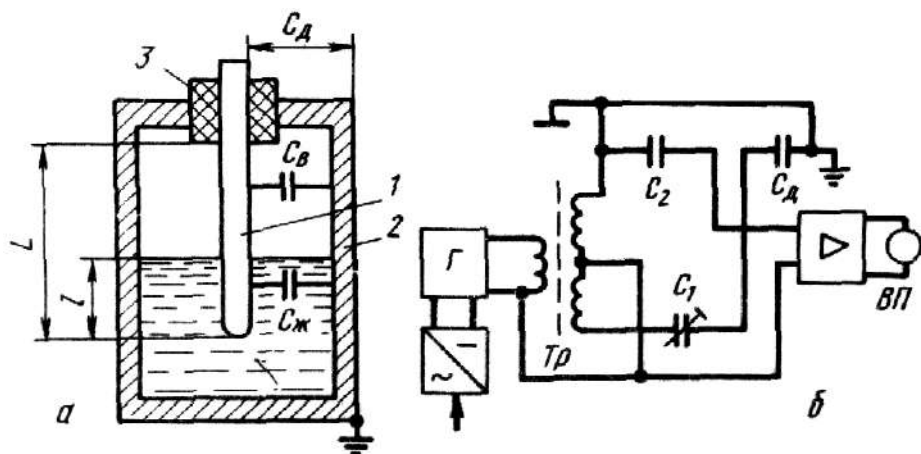


Рисунок 6.4 - Устройство емкостного уровнемера для измерения уровня неэлектропроводящих жидкостей (в) и его (б) принципиальная электрическая схема

В контролируемую среду опущен электрод 1. Вторым электродом служит заземленный электропроводящий корпус сосуда 2. Электрод изолирован от корпуса сосуда с помощью втулки 3. Таким образом, преобразователь состоит из двух параллельно соединенных конденсаторов: конденсатор $C_{ж}$ образован частью электродов и диэлектриком - жидкостью, уровень которой изменяется; конденсатор $C_{в}$ образован остальной частью электродов и диэлектриком - воздухом.

Емкость датчика $C_{Д}$ выражается уравнением

$$C_{Д} = C_{ж} + C_{в} [l \varepsilon_{ж} + (L-l) \varepsilon_0] \frac{2\pi}{\ln(R_1/R_2)},$$

где L - полная длина электрода, м; l - глубина погружения электрода в жидкость, м; $\varepsilon_{ж}$ и ε_0 - диэлектрическая проницаемость жидкости и воздуха, Ф/м; R_1 и R_2 - радиусы внешнего и внутреннего электродов, м.

Измерение электрической емкости датчика производится индуктивно-емкостным мостом, состоящим из индуктивностей двух вторичных обмоток трансформатора T_p , конденсаторов C_1 и C_2 и емкости датчика $C_{Д}$. Измерительный мост питается генератором G с частотой 100 кГц. С изменением уровня контролируемой среды изменяется глубина погружения электрода, следовательно, меняется электрическая емкость датчика, что приводит к нарушению баланса моста и появлению на его выходе сигнала дисбаланса, пропорционального изменению уровня измеряемой среды. Сигнал разбаланса поступает на вход усилителя, выходное напряжение которого измеряется вторичным прибором ВП. Емкостные уровнемеры выпускаются с пределом допускаемой основной погрешности от 0,5 до 2,5 %. К числу их недостатков следует отнести зависимость показаний от изменения диэлектрической проницаемости жидкостей при колебаниях температуры. Емкостные уровнемеры непри-

годны для измерения уровня вязких, пленкообразующих, кристаллизующихся и выпадающих в осадок жидкостей, а также взрывоопасных сред.

Акустические уровнемеры находят применение при дистанционных измерениях в технологических процессах, связанных с использованием токсичных и взрывоопасных сред как однородных, так и неоднородных, вязких, кристаллизующихся, выпадающих в осадок, находящихся под давлением до 4 МПа и температуре от 5 до 80 °С. По принципу действия акустические уровнемеры разделяют на локационные, поглощения и резонансные. Локационные уровнемеры основаны на фиксировании времени прохождения ультразвуковых колебаний от источника до приемника после отражения их от границы раздела газ-жидкость, уровень которой контролируется. В уровнемерах поглощения уровень жидкости определяется по ослаблению интенсивности ультразвука при прохождении через слой жидкости и газа. Резонансные уровнемеры основаны на измерении частоты собственных колебаний столба газа над уровнем жидкости, которая зависит от уровня жидкости.

В промышленности наибольшее распространение получили локационные уровнемеры типа ЭХО, применяемые для непрерывного автоматического дистанционного контроля уровня жидкости и сыпучих сред через газовую среду. При этом время распространения ультразвуковых колебаний τ от излучателя до отражающей поверхности и обратно определяется выражением

$$\tau = 2(H-h)/a ,$$

где H - расстояние от источника излучения до нулевого уровня, м; h - высота уровня жидкости или сыпучего слоя, м; a - скорость распространения звука в газовой среде, м/с.

Радиоизотопные уровнемеры предназначены для непрерывного бесконтактного дистанционного измерения уровней жидкостей и сыпучих тел. Принцип действия этих приборов основан на изменении степени ослабления γ -излучения на границе раздела двух сред, испускаемого радиоактивными изотопами цезием ^{137}Cs или кобальтом ^{60}Co через контролируемую среду. В металлургии радиоизотопные уровнемеры применяют для измерения уровня жидкого металла. Так, в кристаллизаторах источник γ -лучей устанавливают с одной стороны кристаллизатора, а счетчик - с противоположной. Поток γ -лучей, проходя через стенки кристаллизатора и расплавленный металл, попадает на счетчик. При понижении уровня расплавленного металла поглощение уменьшается и интенсивность излучения, прошедшего через кристаллизатор, возрастает. Сигнал от счетчика через измерительные блоки воздействует на исполнительный механизм, который перемещает детектор вверх до положения, соответствующего уровню металла в кристаллизаторе и регистрируемого вторичным прибором.

К недостаткам радиоизотопных уровнемеров следует отнести необходимость принятия специальных мер биологической защиты персонала.

Более перспективны для контроля уровня жидкого металла радиоволновые методы, основанные на зависимости параметров колебаний электромагнитных волн от высоты уровня жидкости. К радиоволновым методам относятся радиолокационный, радиоинтерференционный, эндовибраторный и резонансный.

В основу работы радиолокационных уровнемеров положено явление отражения электромагнитной волны от границы раздела двух сред с различной электрической и магнитной проницаемостью. Уровень контролируемой среды h определяется путем измерения времени прохождения радиосигнала τ от момента его испускания излучателем до момента фиксации отраженного сигнала приемником

$$\tau = 2\sqrt{\epsilon\mu}/C(H-h),$$

где ϵ - диэлектрическая проницаемость газовой среды, Ф/м; μ - магнитная проницаемость, Г/м; C - скорость распространения электромагнитной волны в вакууме, м/с.

Недостатками уровнемеров данного типа являются сложность точного измерения времени прохождения радиоволн и наличие в зоне контроля других металлических предметов, в частности, металлических стенок емкостей, что требует применения узконаправленных излучателей.

Схема радиолокационного уровнемера, применяемого для контроля уровня границы шлак-металл, а также определения верхней границы расплава, через боковую стенку рабочей емкости.

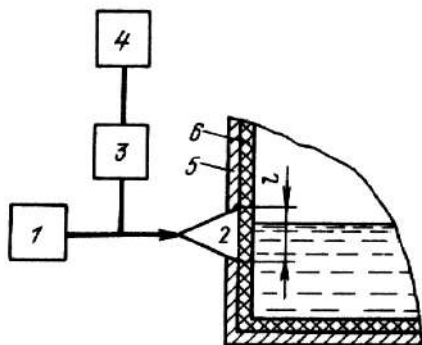


Рисунок 6.5 - Схема радиолокационного уровнемера для контроля уровня жидких металлов и шлаков

Высокочастотный сигнал, возбуждаемый генератором 1, поступает на антенну-излучатель конусообразной формы 2, с размером основания конуса 1, равным диапазону изменения уровня контролируемого расплава. Для установки излучателя 2 в металлической обшивке 5 емкости вырезается отверстие, соответствующее размерам основания конусообразного излучателя. Поскольку огнеупорная футеровка 6 емкости пропускает радиоволны, то изменение границы раздела шлак-металл или верхнего уровня расплава приводит к изменению прошедшей и отраженной энергии радиосигнала, что создает изменение сигнала на детекторе 3 и вторичном преобразователе 4.

Измерение уровня сыпучих тел в бункерах, шахтах и других устройствах значительно усложняется в сравнении с контролем уровня жидкостей, что связано с

неоднородностью размеров твердых частиц и их ограниченной подвижностью. Это, как правило, приводит к расположению поверхности сыпучих материалов под углом естественного откоса к горизонтали. К трудностям измерения уровня сыпучих материалов следует также отнести их способность к налипанию и абразивному воздействию на первичные датчики контроля, а также, как правило, запыленности газового пространства, что требует дополнительных мер по обеспечению взрывобезопасности.

Уровнемеры для измерения уровня сыпучих сред подразделяют на следующие основные типы: электромеханические, электрические, электронные, радиоизотопные, весовые.

Простейшими из них по принципу работы являются весовые (массовые), основанные на взвешивании бункера вместе с имеющимся в нем материалом.

В качестве примера электромеханического уровнемера приведена схема лотового уровнемера, чувствительным элементом которого является лот 1, представляющий собой массивное тело, прикрепленное с помощью гибкого троса 2 к механизму подъема и стопорения 5.

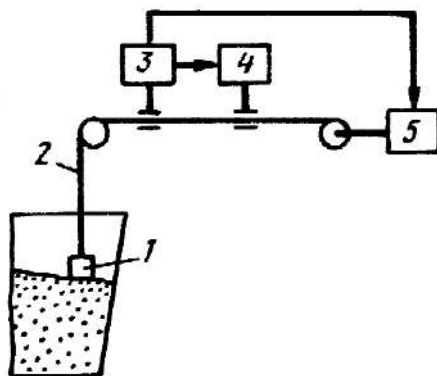


Рисунок 6.6 - Схема лотового уровнемера для сыпучих материалов

Перед измерением лот 1 фиксируется с помощью механизма подъема 5 в крайнем верхнем положении, после чего растормаживается и под действием собственного веса начинает опускаться. В момент движения троса реле натяжения 3 фиксирует начало его движения и посылает электрический сигнал на счетное устройство 4 для начала отсчета уровня. При касании лотом поверхности сыпучего материала в бункере меняется натяжение троса, что вновь фиксируется реле натяжения троса 3 и одновременно посылается сигнал на отключение счетного устройства 4 и включение механизма подъема лота 5. После сброса на счетном устройстве предыдущих значений уровня весь цикл измерения повторяется.

Для контроля и регулирования уровня шихты в доменной печи применяют радиоизотопные уровнемеры. В верхнем ряду защитных сегментов колошника доменной печи в диаметрально противоположных точках устанавливают две амбразуры с источником 1 радиоактивного излучения.

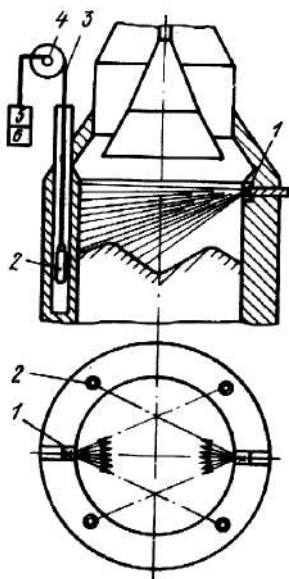


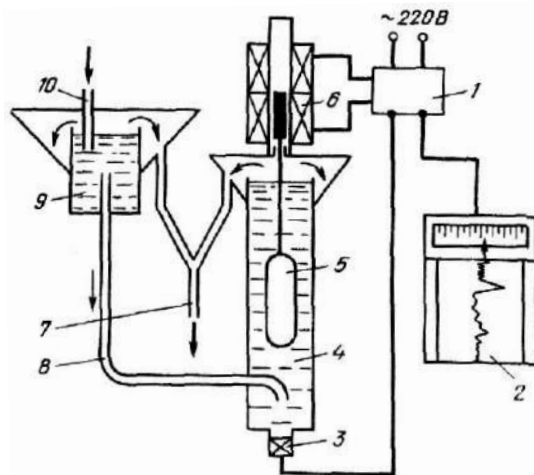
Рисунок 6.7 - Схема расположения неподвижного источника и подвижного приемника излучения радиоизотопного измерителя уровня шихты в доменной печи

Излучение двух источников проходит через шахту доменной печи и попадает на четыре подвижных детектора излучения 2, перемещающихся в трубках холодильников. Сигналы от детекторов по кабель-тросам 3 поступают в токосъемники 4, а затем в блоки усиления и измерения и на исполнительные механизмы подъема детекторов 5 и 6. Каждый источник облучает два противоположных детектора. Если детектор находится ниже уровня шихты, то γ -лучи на него не попадают, если выше уровня шихты, то под действием γ -лучей в нем вырабатывается электрический сигнал. Детекторы перемещаются вниз или вверх до тех пор, пока не будут расположены на уровне, соответствующем уровню шихты. В этом случае электрический сигнал равен компенсационному. Положение детекторов регистрируется самопишущим прибором на диаграмме. Максимальный диапазон измерения уровня шихты составляет 4 м; абсолютная погрешность измерения при горизонтальном расположении уровня шихты ± 6 см.

6.2 Плотномеры жидкостей и газов

Плотность материалов при постоянной температуре является одним из показателей их качества. Приборы для измерения плотности жидких и сыпучих тел по принципу действия делятся на поплавковые, весовые, гидростатические, манометрические, звуковые и радиоизотопные.

В поплавковых плотномерах (ареометрах) используется принцип определения глубины погружения плавающего в контролируемой жидкости поплавка. Схема плотномера с плавающим поплавком.



а – с плавающим поплавком; б – весовой плотномер

Рисунок 6.8 - Схемы плотномеров

Жидкость по трубе 10 поступает в переливной сосуд 9, обеспечивающий постоянство напора. Далее по трубе 8 жидкость попадает в измерительную камеру 4, снабженную переливным устройством, из которого избыточная жидкость стекает по трубе 7. Изменение плотности жидкости вызывает вертикальное перемещение поплавка 5 и связанного с ним сердечника. Перемещение сердечника фиксируется индуктивным датчиком 6, включенным в схему моста 1, и регистрируется вторичным прибором 2. Терморезистор 3 предназначен для компенсации влияния температуры контролируемой среды, путем включения его в измерительную схему моста.

Весовые, или пикнометрические методы основаны на непрерывном взвешивании некоторого постоянного объема контролируемого вещества и определении ее плотности с учетом того, что масса жидкости при неизменном ее объеме прямо пропорциональна плотности. Весовые плотномеры применяются для измерения плотности вязких жидкостей, суспензий и жидкостей с твердыми включениями. Возможно измерение и плотности газов.

Манометрические методы измерения плотности основаны на том, что давление жидкости P на глубине H от поверхности равно весу столба жидкости при площади основания 1 см^2

$$P = \rho gH,$$

где ρ – плотность жидкости, кг/м^3 ; g – ускорение свободного падения, м/с^2 .

При неизменной высоте столба жидкости давление является мерой ее плотности. Измерение давления столба жидкости производится аналогично измерению уровня жидкости манометрическими уровнемерами.

В ультразвуковых плотномерах используется зависимость скорости распространения ультразвука в жидкости от ее плотности путем измерения скорости распространения ультразвуковых колебаний в жидкости.

В основу принципа работы гидростатического (пьезометрического) плотномера положено измерение разности давления в двух пьезометрических трубках, погруженных на одинаковую глубину в сосудах с контролируемой и эталонной жидкостями. В целях обеспечения равенства температур обеих жидкостей сосуд с эталонной жидкостью размещают в сосуде с контролируемой жидкостью.

Принцип действия радиоизотопных измерителей плотности основан на измерении плотности γ -излучения радиоактивного источника при прохождении лучей через вещество, поток которых изменяется в зависимости от его плотности.

Структурная схема радиоизотопного плотномера.

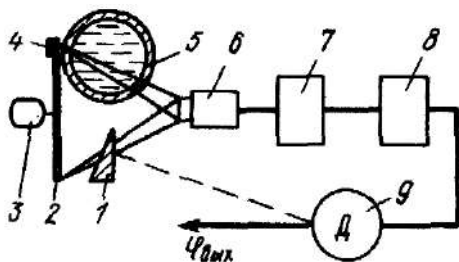


Рисунок 6.9 - Схема радиоизотопного плотномера

На участке трубопровода 5, в котором протекает исследуемая жидкость, устанавливаются источник 4 и приемник 6 γ -излучения. Излучатель 4 размещается на диске 2, вращающемся от двигателя 3. Излучение попеременно попадает на один и тот же сцинтиляционный счетчик 6 через измеряемую среду 5 или через компенсационный клин 1. Со счетчика 6 сигнал поступает на интегрирующее устройство 7 и усилитель переменного тока 8, который управляет работой реверсивного двигателя 9. Последний перемещает клин 1 таким образом, чтобы потоки, поступающие на сцинтиляционный счетчик, были равны. Величина перемещения клина, с которым связана стрелка показывающего прибора, пропорциональна изменению плотности жидкости.

Метод просвечивания γ -лучами находит широкое применение для определения плотности плит, бетонных блоков, грунтовых пульп и т.д.

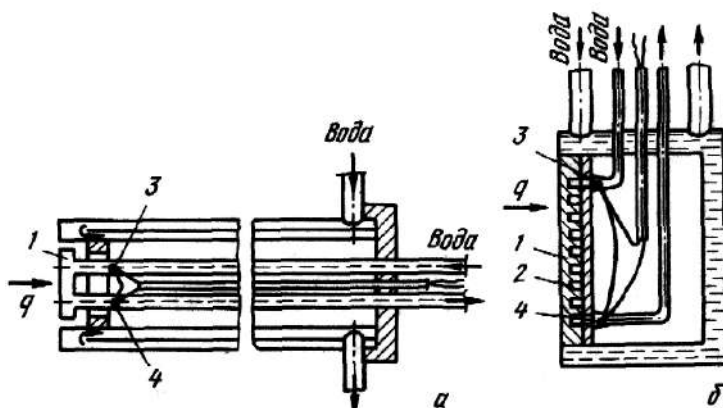
6.3 Тепломеры и термозонды

Измерение тепловых потоков в теплотехнических агрегатах имеет важное значение. Однако в связи с технической трудностью реализации большинства известных методов в системах контроля и автоматического регулирования их применяют в основном при проведении комплексных экспериментальных исследований. Результаты измерений тепловых потоков дают возможность составить реальный тепловой баланс печей, определить соотношение падающих, эффективных и резуль-

тирующих тепловых потоков на поверхности металла и других элементах рабочего пространства печи, участвующих в теплообмене.

Приборы для измерения тепловых потоков называются тепломерами. В зависимости от вида преобладающей доли лучистого или конвективного теплообмена и их соотношения в процессе нагрева изделий, а также формы тепловоспринимающих поверхностей и цели исследований, применяют следующие основные методы измерения тепловых потоков: энтальпийный калориметрический); метод теплового сопротивления; метод эллиптического зеркала.

Энтальпийный метод основан на измерении количества тепла, проходящего через теплочувствительный элемент, путем определения изменения энтальпии (теплосодержания) жидкости, омывающей теплочувствительный элемент тепломера. Схемы торцового и углового тепломеров (калориметров).



а – торцового; б - углового

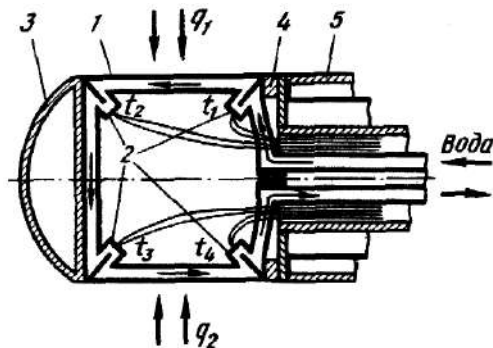
Рисунок 6.10 – Устройство энтальпийных тепломеров

В первом случае теплочувствительный элемент 1 представляет собой медную коробочку, а во втором - медную пластину 1 с расположенным в ней меевиком 2, по которому циркулирует тепловоспринимающая жидкость (вода). С целью повышения степе черноты термочувствительного элемента на его наружную поверхность нанесено зачерняющее покрытие. Температура воды, омывающей теплочувствительный элемент, контролируется с помощью двух термопар 3 и 4, установленных в проводящем и отводящем патрубках непосредственно на их входе и выходе. По измеренному значению разности температур Δt и известном расходе воды G и ее теплоемкости с определяют суммарный тепловой поток q , падающий на поверхность теплочувствительного элемента площадью F

$$q = Gc\Delta t/F.$$

Тепломеры данной конструкции позволяют определять тепловой поток только в одном направлении.

Для одновременного определения падающего и эффективного тепловых потоков разработан тепломер энтальпийного типа, позволяющий контролировать тепловые потоки в двух противоположных направлениях.



1 – тепловоспринимающая рамка; 2 – термодатчики; 3 – водоохлаждаемый торец головки; 4 – предохранительная медная головка; 5 – корпус головки

Рисунок 6.11 - Головке тепломера с двумя противоположно направленными тепловоспринимающими поверхностями

Теплочувствительный элемент 1 имеет форму пустотелой рамки с термодатчиками 2, по которой циркулирует тепловоспринимающая жидкость, подводимая через один из патрубков и отводимая через другой. Рамка со всех сторон, кроме двух противоположных рабочих теплочувствительных плоскостей, теплоизолирована от окружающей среды.

Верхняя плоскость теплочувствительного элемента воспринимает часть падающего на металл теплового потока q_1 , величину которого определяют по изменению энтальпии воды, омывающей данную площадку. Контроль за изменением температуры Δt_{1-2} воды обеспечивает дифференциальная термодатчики t_1, t_2 на входе и выходе верхней площадки. Дифференциальная термодатчики t_3 и t_4 фиксирует дальнейшее изменение температуры Δt_{3-4} воды у нижней теплочувствительной площадки, по которой определяют эффективный тепловой поток от металла q_2 в окружающее пространство. Полученные значения падающего и эффективного тепловых потоков позволяют определить результирующий тепловой поток $q_{рез}$ в металле

$$q_{рез} = q_{пад} - q_{эф} = (Gc/F \varepsilon) (\Delta t_{1-2} - \Delta t_{3-4}),$$

где G - часовой расход воды, кг/ч; F - площадь тепловоспринимающего приемника, m^2 ; ε - степень черноты тепловоспринимающей поверхности; c - теплоемкость воды, $kJ/(kg \cdot K)$.

При измерении тепловых потоков всеми типами тепломеров вблизи контролируемой поверхности необходимо учитывать влияние экранирования самим тепломером теплового потока, падающего на контролируемую поверхность, а также наличие между поверхностью и тепломером излучающего газа. Самоэкранирование

уменьшает величину отраженного от поверхности объекта теплового потока, а излучение промежуточного слоя газа, наоборот, способствует увеличению теплового потока. Исследованиями установлено, что оптимальным является расположение тепломера над объектом на высоте, определяемой из соотношения

$$h/d = 2 \div 3,$$

где h - высота теплоприемника над объектом, м; d - диаметр теплоприемника, м.

В этом случае погрешности, вносимые за счет эффекта экранирования и дополнительного излучения промежуточного слоя газа, практически компенсируют друг друга.

Энтальпийным тепломерам присущи существенные погрешности, возникающие вследствие образования накипи на внутренних поверхностях теплочувствительных элементов, а также неточности определения температуры воды, ее расхода и теплоемкости.

Значительно чаще для измерения тепловых потоков применяют термозонды, принцип работы которых основан на методе теплового сопротивления. Метод теплового сопротивления заключается в измерении стационарного теплового потока, проходящего через тепло-воспринимающую стенку с известным коэффициентом теплопроводности, имеющую с внутренней стороны контакт с охлаждающей жидкостью обычно водой.

Устройство теплочувствительной головки термозонда.

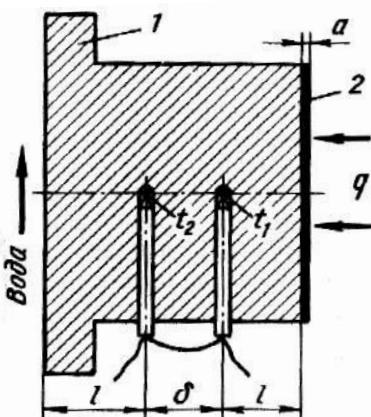


Рисунок 6.12 - Головка приемника термозонда

Головка 1 выполнена из твердого материала с низким коэффициентом теплопроводности. Перепад температур Δt в головке фиксируется дифференциальной термопарой t_1 и t_2 , рабочие спаи которой установлены в специальных отверстиях на фиксированном расстоянии b . Величина теплового потока q определяется по формуле

$$q = \lambda / (\delta \Delta t) .$$

Рассмотренные методы контроля тепловых потоков позволяют определять лишь суммарный тепловой поток, включающий излучение и конвекцию.

При исследовании теплообмена в высокотемпературных печах важное значение приобретает определение лучистой составляющей теплового потока. Исключение конвективной составляющей из показаний прибора в ряде случаев обеспечивается созданием диатермической газовой завесы между тепловоспринимающей головкой зонда и газовой средой печного пространства. Диатермическая газовая завеса создается подачей перед рабочей поверхностью теплочувствительной головки струи воздуха или азота. Чтобы исключить влияние конвективной составляющей при измерении теплового потока, необходимо соблюдать равенство температур подаваемой газовой завесы и стенки тепловоспринимающего элемента тепломера, отношение скорости диатермической газовой завесы к скорости печных газов в точке контроля должно быть больше 3. Конвективная составляющая теплового потока может быть определена расчетным путем после замера полного теплового потока (при отключении газовой завесы), как разность между полной и лучистой составляющими теплового потока.

Непосредственно раздельное измерение конвективной и лучистой составляющих теплового потока реализовано в тепломере с применением оптических кристаллов, коэффициент внутреннего поглощения которых близок к нулю, например, из фтористого лития. Схема устройства термозонда с кристаллом.

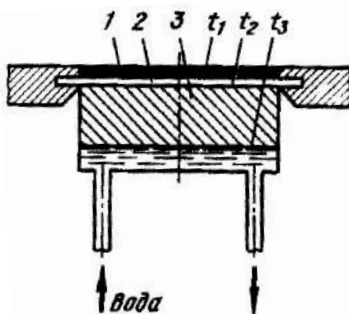


Рисунок 6.13 - Схема устройства термозонда с оптическим кристаллом

В данном тепломере кристалл 2 полностью пропускает через себя лучистую составляющую теплового потока и нагревается лишь за счет конвекции, а лучистая составляющая создает тепловой поток в тепловоспринимающем элементе 3, охлаждаемом с нижней стороны водой. Разность температур в пластине и тепловоспринимающей элементе фиксируется термопарами в точках t_1 , t_2 и t_3 . С целью предотвращения непосредственного теплового контакта между оптической пластиной и тепловоспринимающим элементом 3, имеется воздушный зазор 2. Величины конвективной и лучистой составляющих определяют по формулам теории теплообмена или путем тарировки тепломера.

Рассмотренные выше методы измерения лучистых тепловых потоков позволяют контролировать тепловое излучение в пределах полу-сферы. Однако в практике тепловых измерений часто возникает необходимость контроля направленных потоков лучистой энергии. Для этой цели создан ряд конструкций узкоугольных радиометров. Схема радиометра, в котором угол визирования теплочувствительного элемента 1 ограничивается сменным диафрагмирующим тубусом 2.

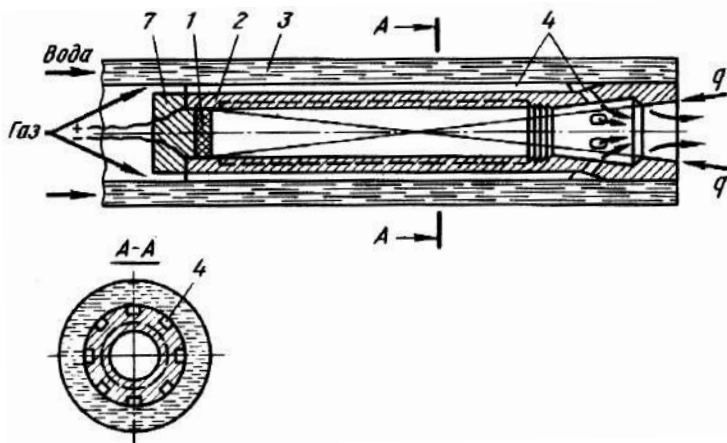


Рисунок 6.14 – Схема узкоугольного радиометра

С целью предотвращения загрязнения внутренних поверхностей радиометра передняя часть тубуса продувается через специальные отверстия 4 сжатым воздухом. Корпус прибора защищен водоохлаждаемой фурмой 3. Угол визирования радиометра зависит от расстояния между радиометром и контролируемой поверхностью и площадью визирования на этой поверхности.

При измерении тепловых потоков от объектов с равномерным полем температур в контролируемой области выходной сигнал от радиометра описывается следующим уравнением

$$E = k\theta F_v (T_{об}^4 - T_{пр}^4),$$

где E - выходной сигнал термоприемника, мВ; k - приведенный коэффициент; θ - угол визирования, град; F_v - площадь визирования, m^2 ; $T_{об}$ - температура объекта, К; $T_{пр}$ - температура приемника, К.

Данный тип радиометра относится к радиометрам без конденсирующего устройства (линзы, зеркала). Конденсирующие устройства обеспечивают повышение выходного сигнала радиометра, однако их применение увеличивает погрешность измерений, что связано с загрязнением оптических элементов, ограниченной областью пропускания оптикой теплового излучения и другими факторами. Преимуществом радиометров без компенсирующих устройств является возможность создания прибора с щелевым фокусирующим устройством. Это обеспечивает проведение измерений объектов контроля незначительной ширины, либо выявление отдельных

изотермических линий на объекте путем поворота прибора вдоль продольной оси. При неизотермической контролируемой области объекта будет соответственно изменяться выходной сигнал прибора, что позволяет выявить направление изотермических линий на поверхности объекта.

Другой тип радиометра направленного излучения основан на применении свойства эллиптического зеркала, заключающегося в том, что любой луч, прошедший через один из фокусов эллипсоида вращения с зеркальной внутренней поверхностью, в результате переотражения пройдет и через другой фокус. Схема радиометра с эллиптическим зеркалом.

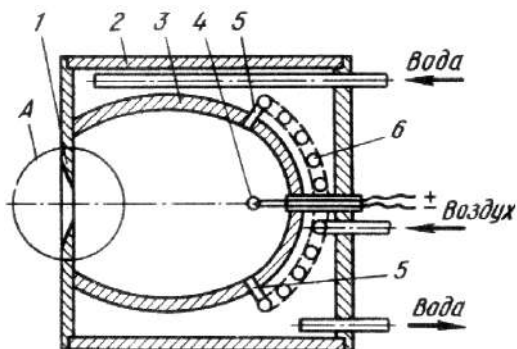


Рисунок 6.15 - Схема радиометра с эллиптическим зеркалом

Основной частью радиометра является замкнутая камера 3 в форме эллипсоида вращения, ограниченная с одной стороны плоскостью с отверстием А, находящимся в одной из фокальных плоскостей. Внутреннюю поверхность камеры 3 покрывают тонким слоем золота или никеля с целью повышения ее отражательной способности. В другом фокусе установлен термопреобразователь 4 с зачерненной поверхностью. Эллиптическое зеркало заключено в металлический корпус 2 и имеет водяное охлаждение. С целью предотвращения попадания в рабочую камеру радиометра печной атмосферы и пыли в полость эллипсоида при измерении подают под небольшим давлением сухой очищенный воздух. Воздух проходит через змеевик 6, где он приобретает температуру охлаждающей воды, и через отверстие 5 попадает в рабочую полость и выходит из нее через диафрагму 1. Из-за технической сложности установки термопреобразователя точно в фокусе эллиптического зеркала его диаметр при изготовлении увеличивают приблизительно в 2 раза больше диаметра отверстия диафрагмы, составляющего 1-2 мм.

При измерении тепловых потоков радиометром с эллиптическим зеркалом необходимо учитывать то, что на точность и стабильность его показаний влияют чистота и влажность продуваемого воздуха, который может привести к загрязнению и помутнению зеркальной поверхности. Кроме того, при продувании рабочей камеры воздухом происходит охлаждение термопреобразователя за счет конвективного теплообмена, что приводит к дополнительным погрешностям измерений, особенно при непостоянстве расхода и влажности воздуха. Непостоянство температуры охлаждающей воды приводит к колебаниям условий охлаждения эллиптического зеркала

и воздуха на обдув. В целях устранения этой причины в тело зеркала устанавливают дополнительный термопреобразователь, по величине сигнала которого регулируют расход охлаждающей воды.

Так как существует функциональная зависимость между тепловым потоком и температурой, то метод измерения тепловых потоков может быть использован также для измерения температуры внутренней поверхности футеровки печей. Для этой цели в сталеплавильных печах успешно применяют шомпольные термозонды.

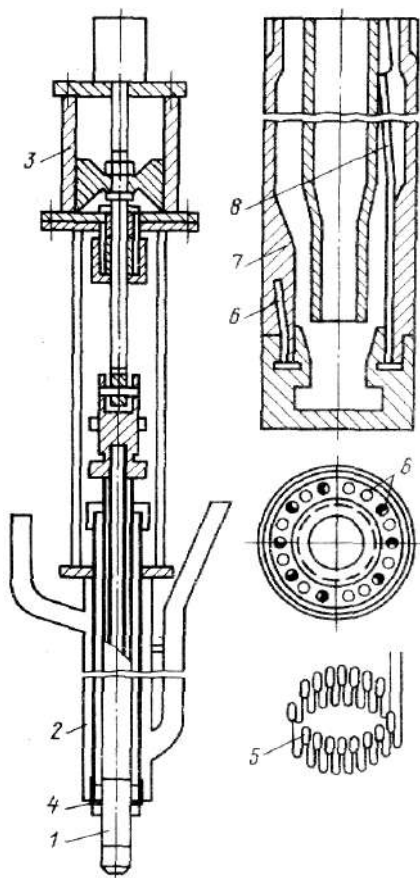


Рисунок 6.16 – Шомпольный термозонд

Термозонд состоит из трех основных узлов: водоохлаждаемого цилиндрического шомпола 1 с чувствительным элементом на конце, водоохлаждаемой фурмы 2 и пневмоцилиндра 3, приводящего в движение шомпол. Фурму устанавливают в кладке свода или стен печи, конец фурмы с кольцевым резцом 4, служащим для очистки поверхности шомпола, погружают в кладку до внутренней ее поверхности. Шомпол выдвигают в рабочее пространство печи только на время измерения, а затем убирают до следующего замера внутрь фурмы. Налет плавильной пыли, брызг

металла и шлака, успевший образоваться на цилиндрической поверхности чувствительного элемента во время измерения, очищают кольцевым резцом 4.

Чувствительным элементом шомпола служат дифференциально включенные термоэлементы из миниатюрных хромель-алюмелевых термопар 5, горячие и холодные спаи которых расположены на разных расстояниях от наружной поверхности шомпола. Термоэлементы располагаются в отверстиях стенки шомпола 6, высверленных с торца термоцилиндра 7 по всей его окружности на различную глубину. Таким образом, термоэлементы фиксируют температурный перепад по толщине стенки термоцилиндра между заданными ее сечениями. Этот перепад температур определяется тепловым потоком, проходящим через стенку теплоприемника, который в свою очередь связан с величиной падающего теплового потока. Для вывода концов термоэлементов служит трубка 8.

Шомпол термозонда периодически опускается через водоохлаждаемую форму в рабочее пространство печи с помощью пневматического устройства по импульсу от реле времени. Замеры осуществляются через каждые 2-3 мин, время пребывания шомпола в печи 30 с. Вторичный прибор (автоматический потенциометр) включается в работу через 20 с после выдержки шомпола в рабочем пространстве печи, что определяется его тепловой инерцией. За 1 с до возвращения шомпола в фурму показания потенциометра блокируются до следующего замера. Температура футеровки печи измеряется с точностью $\pm 15^\circ\text{C}$ при диапазонах измерения температур в пределах 1200-1800 $^\circ\text{C}$.