

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН
НЕКОММЕРЧЕСКОЕ АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО
АЛМАТИНСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ЭНЕРГЕТИКИ И СВЯЗИ
ИМЕНИ ГУМАРБЕКА ДАУКЕЕВА**

С. Г. Хан, Ж. С. Тлеубаева

ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЙ

Учебное пособие

**RS Global
Warsaw, Poland
2020**

УДК 389.14

DOI: 10.31435/rsglobal/016

*Печатается по плану издания
Министерства образования Республики Казахстан на 2020 г.*

Рецензенты:

доктор технических наук, профессор кафедры «Автоматизация и управление» КазНТУ им. К. И. Сатпаева Б. А. Сулейменов,

доктор технических наук, профессор, Университета «AlmaU»
С. К. Исакова,

доцент кафедры «Электроники и робототехники» АУЭС Е. О. Елеукулов

Хан С. Г., Тлеубаева Ж. С.

Технические средства измерений: Учебное пособие. –Warsaw: RS Global Sp. z O. O., 2020. – 117 с.

ISBN 978-83-957916-3-5

В учебном пособии излагаются основные методы и средства измерений, применяемые для автоматизации теплотехнических процессов. Освещается методика и средства измерения температуры, давления, расхода жидкости, газа, пара и других величин.

Учебное пособие предназначено для студентов специальности «Автоматизация и управление».

ISBN 978-83-957916-3-5

© НАО «Алматинский университет
энергетики и связи имени
Гумарбека Даукеева», 2020 г.

© Хан С. Г., 2020

© Тлеубаева Ж. С., 2020

© RS Global Sp. z O.O., 2020

СОДЕРЖАНИЕ

| | |
|--|----|
| Введение..... | 5 |
| Глава 1. Измерение температуры..... | 7 |
| 1.1 Общие сведения..... | 7 |
| 1.2 Манометрические термометры..... | 10 |
| 1.3 Термоэлектрические преобразователи (ТЭП)..... | 14 |
| 1.4 Средства измерения сигналов ТЭП..... | 23 |
| 1.5 Термопреобразователи сопротивления (ТПС)..... | 32 |
| 1.6 Средства измерения, работающие в комплекте с ТПС..... | 34 |
| 1.7 Измерение теплового излучения..... | 40 |
| 1.8 Средства измерения теплового излучения..... | 45 |
| 1.9 Контрольные вопросы к главе 1..... | 49 |
| Глава 2. Измерение давления..... | 51 |
| 2.1 Общие сведения..... | 51 |
| 2.2 Жидкостные СИ давления с гидростатическим уравновешиванием..... | 53 |
| 2.3 Деформационные средства измерения давления..... | 57 |
| 2.4 Общие методические указания по измерению давления..... | 66 |
| 2.5 Контрольные вопросы к главе 2..... | 66 |
| Глава 3. Измерение количества и расхода жидкости, газа и пара..... | 68 |
| 3.1 Общие сведения..... | 68 |
| 3.2 Объемные счетчики..... | 68 |
| 3.3 Скоростные счетчики..... | 70 |
| 3.4 Расходомеры переменного перепада давления..... | 71 |
| 3.5 Расходомеры обтекания..... | 74 |
| 3.6 Электромагнитные расходомеры..... | 75 |
| 3.7 Ультразвуковые расходомеры..... | 79 |
| 3.8 Тахометрические расходомеры..... | 82 |
| 3.9 Тепловые расходомеры..... | 83 |
| 3.10 Кориолисовый массовый расходомер..... | 84 |
| 3.11 Контрольные вопросы к главе 3..... | 88 |
| Глава 4. Измерение уровня..... | 89 |
| 4.1 Общие сведения..... | 89 |
| 4.2 Поплавковые уровнемеры..... | 89 |
| 4.3 Буйковые уровнемеры..... | 90 |
| 4.4 Гидростатические СИ уровня..... | 91 |
| 4.5 Электрические СИ уровня..... | 92 |
| 4.6 Акустические СИ уровня..... | 94 |
| 4.7 Контрольные вопросы к главе 4..... | 95 |
| Глава 5. Измерения физико-химических свойств жидкостей и газов..... | 96 |
| 5.1 Средства измерения плотности..... | 96 |

| | | |
|----------|--|-----|
| 5.2 | Средства измерения вязкости жидкостей..... | 99 |
| 5.3 | Контрольные вопросы к главе 5..... | 101 |
| Глава 6. | Измерение концентрации..... | 103 |
| 6.1 | Общие сведения..... | 103 |
| 6.2 | Магнитные газоанализаторы..... | 104 |
| 6.3 | Оптические газоанализаторы..... | 105 |
| 6.4 | Контрольные вопросы к главе 6..... | 107 |
| Глава 7. | Анализ состава жидкостей..... | 108 |
| 7.1 | Общие сведения..... | 108 |
| 7.2 | Кондуктометрический метод анализа растворов..... | 108 |
| 7.3 | Потенциометрический метод анализа растворов..... | 110 |
| 7.4 | Контрольные вопросы к главе 7..... | 114 |
| | Список литературы..... | 115 |

Введение

XXI век характеризуется ускоренным развитием науки и промышленного производства. Последнее немыслимо без широчайшего применения самых разнообразных измерений и измерительных устройств. Место измерительной техники в современном мире могут характеризовать следующие данные. Затраты на измерительную технику в настоящее время составляют 10-15% всех материальных затрат на общественное производство, а в таких отраслях промышленности, как нефтеперерабатывающая, нефтехимическая, радиоэлектронная, самолетостроение и другие, эти затраты достигают 25%. В настоящее время без измерений не может обойтись ни одна область деятельности человека.

Основной потребитель измерительной техники – промышленность. Здесь измерительная техника – неотъемлемая часть технологических процессов, т.к. используется для получения информации о многочисленных режимных параметрах, по которым в промышленности проводится контроль качества продукции и сырья, и другие процессы.

Все производства различных отраслей промышленности в зависимости от характера технологического процесса можно подразделить на две группы: производства с непрерывным (НХТП) и производства с дискретным (штучным) характером технологических процессов (ДХТП). К первой группе относятся производства таких отраслей промышленности, как нефтеперерабатывающая, газоперерабатывающая, нефтехимическая, химическая, металлургическая, *теплоэнергетическая* и др., ко второй группе – машиностроение, приборостроение, радиоэлектронная, пищевая и др.

На производствах с НХТП измерения таких параметров, как температура, давление, расход, уровень и количество вещества составляют более 86% от общего числа всех измерений, на производствах с ДХТП преобладают измерения числа изделий, длина, время, электрические величины – 75%.

Современные производства характеризуются значительной сложностью и мощностью технологических аппаратов, большим числом различных параметров, которые необходимо снять (измерить). Все это определяет тот факт, что проведение современных технологических процессов без их частичной и полной автоматизации невозможно.

Попадая на производство, специалист, будучи прямо или косвенно связан по работе с измерениями, сталкивается с обилием измерительных задач. Облегчить ему изучение методов и средств измерений должно изучение дисциплины «Технические средства измерения».

Для успешной инженерной деятельности совершенно *необходимо изучить и освоить методы измерений и основные принципы построения средств измерения физических величин*. При этом на первое место следует поставить знание методов измерения. Это обусловлено тем, что именно

методы измерений и физические принципы работы приборов являются наиболее постоянными компонентами, тогда как конкретные схемные решения и элементная база средств измерения непрерывно изменяются и совершенствуются.

Измерения осуществляются с помощью специальных *технических средств измерений*, различных по сложности и принципам действия.

Средствами измерений (СИ) называют технические средства, используемые при измерениях и имеющие *нормированные метрологические характеристики*. Основными видами СИ являются *меры*, измерительные устройства (*приборы и преобразователи*). *Рабочими СИ* называются все меры, приборы и преобразователи, предназначенные для практических повседневных измерений во всех отраслях народного хозяйства. Они подразделяются на средства измерений повышенной точности (лабораторные) и *технические*. Совокупность *технических СИ*, служащих для выполнения измерений, методов и приемов проведения измерений и интерпретации их результатов, принято определять понятием *измерительная техника*.

Материал учебного пособия является переработанным и дополненным материалом учебного пособия по дисциплине «Технологические измерения и приборы», изданного автором Хан С.Г в 2012 году [7], и включает в себя семь глав, обеспечивающие в совокупности необходимый уровень подготовки специалистов в области разработки систем автоматизации и измерительной техники.

Материал каждой главы посвящен вопросу измерения конкретной физической величины. В первой главе учебного пособия излагаются основы измерения самого распространенного технологического параметра – температуры и рассмотрены принципы работы основных средств измерения температуры. Вторая глава посвящена вопросам измерения давления и средствам измерения давления. В третьей главе излагаются основы измерения и средства измерения количества и расхода жидкости, газа и пара. Четвертая глава посвящена вопросам измерения и средствам измерения уровня, пятая глава – физико-химических свойств жидкостей и газов, шестая глава – концентрации. Седьмая глава посвящена анализу состава жидкостей: рассмотрены кондуктометрический и потенциометрический методы анализа растворов и принципы действия соответствующих анализаторов. В конце каждой главы приведены контрольные вопросы.

Дополнен материал третьей главы, посвященной вопросам расходомерии.

В основу учебного пособия положен курс лекций, читаемый авторами на протяжении многих лет в Алматинском университете энергетики и связи имени Гумарбека Даукеева для студентов специальности «Автоматизация и управление».

Глава 1. Измерение температуры

1.1 Общие сведения

Температура – физическая величина, характеризующая степень нагретости тела. Практически все технологические процессы и различные свойства вещества зависят от температуры.

Измерять температуру можно только косвенным путем, основываясь на зависимости от температуры таких физических свойств тел, которые поддаются непосредственному измерению. Эти *свойства* называются *термометрическими*. К ним относятся длина, объем, плотность, термоЭДС, электрическое сопротивление и т. д. *Вещества*, характеризующиеся термометрическими свойствами, называются *термометрическими*.

Средства измерений температуры называют термометрами. Для создания термометра необходимо иметь *температурные шкалы*.

Температурной шкалой называют конкретную функциональную числовую связь температуры со значениями измеряемого термометрического свойства. Первые температурные шкалы (таблица 1.1) основывались на допущении линейной связи между температурой и термометрическим свойством, в качестве которого использовалось расширение объема жидкости.

Для построения температурной шкалы выбирались две опорные (реперные) точки t_1 и t_2 , представляющие собой температуры фазового равновесия чистых веществ. $(t_2 - t_1)$ – называется температурным интервалом. В шкалах Фаренгейта (1715 г.), Цельсия (1742 г.) и Реомюра (1776 г.) точка плавления льда t_1 равна соответственно $+32$ °F, 0 °C, 0 °R, а точка кипения воды $t_2 - 212$ °F, 100 °C, 80 °R. $(t_2 - t_1)$ в этих шкалах делится соответственно на $N = 180, 100, 80$ равных частей. И $1/N$ часть каждого из интервалов называется градусом Фаренгейта – °F, градусом Цельсия – °C и градусом Реомюра – °R. Таким образом, градус для этих шкал не является единицей измерения, а представляет собой единичный промежуток – масштаб шкалы. Поэтому такие *шкалы* называются *условными*.

Таблица 1.1 – Условные температурные шкалы

| Условные температурные шкалы | Шкала Фаренгейта (°F) | Шкала Цельсия (°C) | Шкала Реомюра (°R) |
|------------------------------|-----------------------|--------------------|--------------------|
| Температура таяния льда | 32 | 0 | 0 |
| Температура кипения воды | 212 | 100 | 80 |
| $1^\circ =$ | 1/180 | 1/100 | 1/80 |

Показания таких термометров, имеющих *разные термометрические вещества* (например, ртуть, спирт и другие), использующих одно и то же

термометрическое свойство и равномерную градусную шкалу, *совпадают лишь в реперных точках* (температура таяния льда и температура кипения воды), а в других точках показания расходятся. Это объясняется тем, что связь между t° и термометрическим свойством нелинейная.

Проблема создания температурной шкалы, не зависящей от термометрических свойств веществ, была решена в 1848 г. Кельвином, а предложенная им шкала была названа *термодинамической*.

Термодинамическая шкала температур основана на использовании *второго закона термодинамики*: коэффициент полезного действия тепловой машины, работающей по обратимому циклу Карно, определяется только температурами нагревателя и холодильника и не зависит от свойств рабочего вещества. Полученная шкала температур не зависит от свойств рабочего (термометрического) вещества и называется *абсолютной шкалой*. Чтобы абсолютная температура имела определенное значение, было предложено принять разность термодинамических температур между точками кипения воды и таяния льда, равной 100° . Принятие такого значения разности преследовало цель сохранения преемственности числового выражения термодинамической температурной шкалы от стоградусной температурной шкалы Цельсия. Таким образом, один градус Кельвина (1К) соответствует одному градусу Цельсия (1°C), так как обе шкалы базируются на одинаковых реперных точках. Для воспроизведения такой температурной шкалы был построен *газовый термометр*. Работа его основана на законах идеальных газов, т.к. газовый термометр заполняется термометрическим веществом – газом, близким к идеальному. Экспериментально было найдено, что для всех газов при давлениях, стремящихся к нулю, в интервале температур $0 \div 100^\circ\text{C}$ температурный коэффициент объемного расширения равен $\beta = 1/273,15$. Таким образом, нулевое значение абсолютной температуры соответствует ($-273,15^\circ\text{C}$). Температура таяния льда по этой шкале составит 273,15 К. Менделеев Д.И. (1874 г.) и одновременно, независимо от него Кельвин предложили построить термодинамическую шкалу температур по 1 реперной точке – тройной точке воды ТТВ (точка фазового равновесия воды в твердой, жидкой и газообразной фазах), которая легко воспроизводится с погрешностью не более 0,0001 К. Температура этой точки принята равной ТТВ = 273,16 К, т.е. выше температуры таяния льда на 0,01 К. Второй реперной точкой является абсолютный нуль, который экспериментально не реализуется, но имеет строго фиксированное положение.

В 1967 году XIII Генеральная конференция по мерам и весам уточнила определение единицы термодинамической температуры в следующей редакции: «Кельвин – это $1/273,16$ часть термодинамической температуры тройной точки воды»: $1\text{К} = 1/273,16 \text{ ТТВ}$. Термодинамическая температура может быть также выражена в градусах Цельсия: $t^\circ\text{C} = T - 273,15 \text{ К}$.

В настоящее время действует принятая на XIII Генеральной конференции по мерам и весам «Международная практическая температурная шкала 1968» МПТШ-68, которая базируется на 11 основных и 27 вторичных реперных точках, охватывающих диапазон температур от 13,956 до 3660 К (от -259,194°С до 3387°С). В таблице 1.2 приведены основные реперные (постоянные) точки МПТШ-68.

Таблица 1.2 – Основные реперные точки МПТШ-68

| № | Состояние фазового равновесия | Значение температуры | |
|----|--|----------------------|----------|
| | | К | °С |
| 1 | Равновесие между твердой, жидкой и парообразной фазами равновесного водорода (тройная точка равновесного водорода) | 13,81 | -259,34 |
| 2 | Равновесие между жидкой и парообразной фазами равновесного водорода при давлении 33,330 кПа (250 мм рт.ст.) | 17,042 | -256,108 |
| 3 | Равновесие между жидкой и парообразной фазами равновесного водорода (точка кипения равновесного водорода) | 20,28 | -252,87 |
| 4 | Равновесие между жидкой и парообразной фазами неона (точка кипения неона) | 27,102 | -246,048 |
| 5 | Равновесие между твердой, жидкой и парообразной фазами кислорода (тройная точка кислорода) | 54,361 | -218,789 |
| 6 | Равновесие между жидкой и парообразной фазами кислорода (точка кипения кислорода) | 90,188 | -182,962 |
| 7 | Равновесие между твердой, жидкой и парообразной фазами воды (тройная точка воды) | 273,16 | 0,01 |
| 8 | Равновесие между жидкой и парообразной фазами воды (точка кипения воды) | 373,15 | 100 |
| 9 | Равновесие между твердой и жидкой фазами цинка (точка затвердевания цинка) | 692,73 | 419,58 |
| 10 | Равновесие между твердой и жидкой фазами серебра (точка затвердевания серебра) | 1235,08 | 961,93 |
| 11 | Равновесие между твердой и жидкой фазами золота (точка затвердевания золота) | 1337,58 | 1064,43 |

В различных областях науки и техники применяется множество принципов и средств измерения температуры. В нефтеперерабатывающей и теплоэнергетической промышленности широкое применение нашли

средства измерения температуры, классификация которых в зависимости от используемого термометрического свойства, приведена в таблице 1.3.

Таблица 1.3 – Технические средства измерения температуры

| Термометрическое свойство | Название средства измерения | Диапазон измерения, °С |
|--|---|---------------------------------------|
| Изменение давления рабочего вещества при постоянном объеме | Манометрический термометр: - газовый - жидкостный - конденсационный | -150 ÷ 600 -150 ÷ 600 -50 ÷ 350 |
| Термоэлектрический эффект (термоЭДС) | Термоэлектрический преобразователь | -200 ÷ 2200 |
| Изменение электрического сопротивления | Термопреобразователь сопротивления: - металлический - полупроводниковый | -260 ÷ 1100 -240 ÷ 300 |
| Тепловое излучение | Пирометры излучения | 1400 ÷ 6000 |

1.2 Манометрические термометры

Действие манометрических термометров основано на использовании зависимости между температурой и давлением рабочего (термометрического) вещества в замкнутой герметичной термосистеме. Манометрические термометры являются техническими приборами и в зависимости от рабочего вещества термосистемы они подразделяются на газовые, жидкостные и конденсационные (парожидкостные). В зависимости от рабочего вещества термосистемы их применяют для измерения температуры жидких и газообразных сред от -150 до +600 °С. Термометры со специальным наполнителем предназначены для измерения t от +100 до +1000 °С.

Манометрические термометры изготавливают показывающие и самопишущие. Некоторые типы термометров изготавливаются с дополнительным устройством для сигнализации (или регулирования) температуры, снабжают передающим преобразователем с выходным унифицированным сигналом постоянного тока 0-5 мА или пневматическим передающим преобразователем с выходным унифицированным пневматическим сигналом 0,2-1 кгс/см² (0,02-0,1 МПа).

Схема устройства показывающего манометрического термометра представлена на рисунке 1.1.

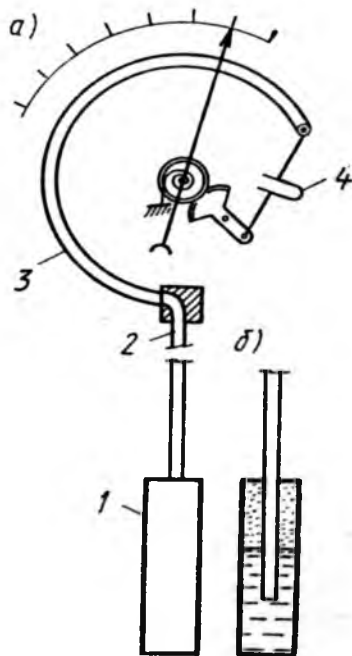


Рисунок 1.1 – Манометрический термометр

Термосистема термометра состоит из термобаллона 1, погружаемого в среду, температура которой измеряется, капилляра 2 и манометрической пружины 3. Один конец пружины впаян в держатель, канал которого соединяет внутреннюю полость манометрической пружины через капилляр с термобаллоном. Второй свободный конец пружины герметизирован и шарнирно связан с секторным передаточным механизмом, на оси которого насажена указательная стрелка. Термосистема термометра заполнена рабочим веществом, например газом (или жидкостью), под некоторым начальным давлением. При нагревании термобаллона увеличивается давление газа в замкнутой герметизированной термосистеме, в результате чего пружина деформируется (раскручивается) и ее свободный конец перемещается. Движение свободного конца пружины преобразуется в перемещение указателя относительно шкалы прибора, по которой производят отсчет температуры.

Уменьшение температурной погрешности газовых и жидкостных термометров, обусловленной отклонением температуры пружины от нормальной ($20\text{ }^{\circ}\text{C}$), достигается введением термометаллического компенсатора 5 в поводок передаточного механизма.

Термобаллон и защитная гильза капилляра изготавливаются из стали марки 1Х18Н9Т, что позволяет применять их на условное давление до 6,4 МПа без защитной гильзы и на условное давление 6,4 – 25 МПа – с защитной гильзой.

Манометрические газовые термометры (МГТ). МГТ позволяют измерять температуру от -150 до +600 °С. Рабочее вещество – азот. Длина соединительного капилляра 0,6 – 60 м. При постоянном объеме газа зависимость его давления от температуры определяется выражением:

$$p_t = p_0(1 + \beta t), \quad (1.1)$$

где p_0 – давление газа при $t=0$ °С ,

β – термический коэффициент давления газа, K^{-1} .

При изменении температуры газа в термобаллоне термометра от t_H до t_K будет изменяться и давление газа в соответствии с выражением:

$$p_K = \frac{p_H(1 + \beta t_K)}{1 + \beta t_H}, \quad (1.2)$$

где p_H и p_K – давление газа при температуре, соответствующей началу t_H и концу t_K шкалы термометра.

После несложных преобразований получаем:

$$\Delta p = p_K - p_H = \frac{p_H \beta (t_K - t_H)}{1 + \beta t_H}. \quad (1.3)$$

Из этого выражения видно, что размер рабочего давления Δp в термосистеме газового термометра прямо пропорционален значению начального давления p_H и диапазону измерения $(t_K - t_H)$ прибора. При повышении температуры термобаллона термометра объем термосистемы его увеличивается в основном за счет расширения термобаллона и увеличения объема внутренней полости манометрической пружины. При увеличении температуры газа, а вместе с тем и давления, происходит частичное перетекание газа из термобаллона в капилляр и манометрическую пружину. При понижении температуры газа в термобаллоне будет происходить обратный процесс. Вследствие этого при измерении температуры газовым термометром постоянство объема газа в термосистеме не сохраняется.

Поэтому зависимость между давлением газа в термосистеме и его температурой незначительно отклоняется от линейной и действительное давление газа в термосистеме при температуре t_K будет меньше подсчитанного по формуле (1.2). Однако эта нелинейность не играет существенной роли и шкала газового термометра получается практически равномерной.

Ввиду больших размеров термобаллона (диаметр – 20 мм, длина – 125мм – 500 мм) газовые термометры не везде могут быть применены.

Манометрические конденсационные термометры (МКТ). Термобаллон МКТ частично заполнен конденсатом (примерно на 0,7-0,75 объема), а в верхней части термобаллона над конденсатом находится насыщенный пар этой жидкости. Манометрическая пружина и капилляр термометра заполнены тем же конденсатом, что и термобаллон.

МКТ выпускаются с пределами измерения от -50 °С до 300 °С. В качестве конденсата используется фреон-22 с пределами измерения от -25 °С до 80°С, пропилен с пределами измерения от -50°С до 60°С, хлористый метил с пределами измерения от 0°С до 125°С, ацетон с пределами измерения от +100°С до 200°С, этиленбензол с пределами измерения от +160°С до 300°С и т.п.

Давление в термосистеме МКТ равно давлению насыщенного пара в термобаллоне. При этом зависимость между давлением насыщенного пара и температурой является вполне определенной, однозначной и известной для конденсата, которым заполнена термосистема термометра. Однако, однозначная зависимость давления насыщенного пара от температуры имеет место только до определенной температуры, называемой критической.

Показания МКТ зависят от высоты расположения термобаллона (выше или ниже) по отношению к корпусу прибора, а также и от изменения атмосферного давления. При этом погрешность показаний термометра в начале шкалы будет больше, чем в конце шкалы, так как в последнем случае давление столба рабочей жидкости в капилляре будет весьма малой долей общего давления в термосистеме.

Жидкостные манометрические термометры (МЖТ). Для заполнения термосистемы МЖТ применяют пропиловый спирт, метанол, силиконовые жидкости и т.п. МЖТ позволяют измерять температуру от -150 до +300 °С. Они выпускаются с различными диапазонами измерения температуры в указанном интервале. Шкала МЖТ получается практически равномерной.

МЖТ существенно отличаются от газовых и конденсационных, так как жидкости, применяемые в качестве заполнителей, практически несжимаемы. В термометрах этого типа объем термобаллона для данной рабочей жидкости должен быть согласован с диапазоном измерения прибора, с изменением объема внутренней полости манометрической пружины при рабочем ходе свободного конца ее, а вместе с тем и с изменением давлением в термосистеме.

При нагреве термобаллона от t_H до t_K жидкость расширяется, а термобаллон увеличивает свой объем. Чем больше диапазон измерения МЖТ, тем меньше должен быть внутренний объем термобаллона при одинаковых прочих условиях. Например, для МЖТ с диапазоном измерения 40-80 °С длина корпуса термобаллона равна 110 мм, а с диапазоном 60-310 °С длина равна 18 мм. Диаметр термобаллона в обоих случаях равна 12 мм.

В МЖТ рабочее давление в термосистеме в отличие от конденсационных и газовых термометров не связано строгой зависимостью с t_H , t_K и начальным давлением. Изменение атмосферного давления на показания жидкостных термометров практически не влияет.

Основные метрологические характеристики манометрических термометров. Манометрические термометры (МТ) рассчитаны на работу при температуре окружающего воздуха от 5 до 50 °С и относительной влажности до 80%. МТ изготавливаются следующих классов точности: 1,0; 1,5; 2,5; и 4.

Изменение показаний МТ, вызываемое влиянием температуры окружающего воздуха при отклонении ее от 20 °С, до любого значения в интервале от 5 до 50 °С не должно превышать значения, вычисленного по формуле:

$$\delta_t = \pm (X + \alpha_t \Delta t), \quad (1.4)$$

где δ_t – изменение показаний термометра, выраженное в % диапазона измерения;

X – значение допускаемого непостоянства показаний термометра, равное половине предела допускаемой основной погрешности, %;

α_t – температурный коэффициент термометра в % на °С (для газовых= 0,05; для конденсационных= 0,04; для жидкостных= 0,075 и для приборов со специальным наполнителем= 0,035);

Δt – абсолютное значение отклонения температуры окружающего воздуха от 20 °С.

1.3 Термоэлектрические преобразователи (ТЭП)

Измерение температуры термоэлектрическими термометрами – термоэлектрическими преобразователями (ТЭП) - основано на использовании открытого в 1821 году Зеебеком *термоэлектрического эффекта*.

Термоэлектрический преобразователь – цепь, состоящая из двух или нескольких соединенных между собой *разнородных* проводников (рисунок 1.2).

Эффект Зеебека: если взять два разнородных проводника, соединенных вместе, и нагреть спаи так, что $t \neq t_0$, то в замкнутой цепи будет протекать электрический ток.

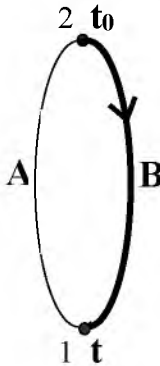


Рисунок 1.2 – Термоэлектрический преобразователь

Если $t > t_0$ то направление тока – такое как на рисунке 1.2 (в спая 1 от В к А). А, В – термоэлектроды; 1, 2 – спая. При размыкании такой цепи на ее концах появится термоЭДС.

Эффект Зеебека обладает обратным свойством (*эффект Пельтье*): если в такую цепь извне подать электрический ток, то в зависимости от направления тока один из спаев будет нагреваться, а другой охлаждаться.

Термоэлектрод, от которого в спая с меньшей температурой идет ток к другому термоэлектроду считают положительным «+», а другой электрод – отрицательным. Например, $t_0 < t$, тогда ток в спая 2 протекает от А к В, значит А – термоположительный, В – термоотрицательный термоэлектроды. Спая, погружаемый в объект измерения температуры t , называют *рабочим спаям* (спая 1), а спая – вне объекта называют *свободным спаям* (концом) (спая 2).

Введем обозначения:

$e_{AB}(t)$ – термоЭДС в спая 1 между термоэлектродами А и В при $t = t$;

$e_{AB}(t_0)$ – термоЭДС в спая 2 между термоэлектродами А и В при $t = t_0$

$E_{AB}(t, t_0)$ – термоЭДС контура, состоящего из термоэлектродов А и В при температуре рабочего спаия t и температуре свободного спаия t_0 .

Примем, что $e_{AB}(t) = -e_{BA}(t)$; $e_{AB}(t_0) = -e_{BA}(t_0)$. Тогда для замкнутой цепи (рисунок 1.2) $E_{AB}(t, t_0) = e_{AB}(t) + e_{BA}(t_0)$ или

$$E_{AB}(t, t_0) = e_{AB}(t) - e_{AB}(t_0) . \quad (1.5)$$

Уравнение (1.5) называется – *основное уравнение ТЭП*.

Если спаи 1 и 2 имеют одинаковые температуры ($t = t_0$), то контактные термоЭДС в каждом спае равны друг другу и направлены навстречу, значит термоЭДС такого контура $E_{AB}(t_0, t_0)$ равна 0.

$E_{AB}(t_0, t_0) = e_{AB}(t_0) - e_{AB}(t_0) = 0$. Если $t_0 = \text{const}$, то $e_{AB}(t_0) = C = \text{const}$, тогда:

$$E_{AB}(t, t_0)|_{t_0=\text{const}} = e_{AB}(t) - C = f(t). \quad (1.6)$$

Если известна зависимость $f(t)$, то путем измерения термоЭДС в контуре можно найти t в объекте измерения. Зависимость $f(t)$ в явном виде пока не может быть получена с достаточной точностью, она устанавливается экспериментальным путем и называется градуировкой ТЭП: построение графика зависимости термоЭДС от температуры. В процессе градуировки температура свободных концов $t_0 = \text{const}$, обычно $t_0 = 0^\circ\text{C}$.

Генерируемая в контуре ТЭП термоЭДС зависит только от химического состава термоэлектродов и температуры спаев и не зависит от геометрических размеров термоэлектродов и размера спаев.

1.3.1 Требования к материалам термоэлектродов ТЭП.

Два любые проводника в паре создают термоЭДС, но лишь ограниченное число термоэлектродов используется для создания ТЭП.

К термоэлектродным материалам, предназначенным для изготовления ТЭП, предъявляются ряд требований:

- а) однозначная и близкая к линейной зависимость термоЭДС от температуры;
- б) жаростойкость и механическая прочность с целью измерения высоких температур;
- в) химическая инертность;
- г) термоэлектрическая однородность материала проводника по длине, что позволяет восстанавливать рабочий спай без переградуировки и менять глубину его погружения;
- д) технологичность изготовления с целью получения взаимозаменяемых по термоэлектрическим свойствам материалов;
- е) высокая чувствительность;
- ж) стабильность и воспроизводимость термоэлектрических свойств, что обуславливает точность измерения температуры и позволяет создать стандартные градуировки;
- з) дешевизна.

Ни один из существующих материалов полностью не удовлетворяет всем требованиям, поэтому для различных пределов температур используются термоэлектроды из различных материалов.

В настоящее время используются пять стандартных градуировок ТЭП, принятых в Республике Казахстан и представленных в таблице 1.4.

Таблица 1.4 – Стандартные градуировки ТЭП

| Стандартная градуировка | Тип | Обозначение ТЭП | Диапазон, °С | Погрешность, °С |
|---|-----|-----------------|--------------|-----------------|
| хромель–копель (ХК) | L | ТХК | -50 ÷ 600 | ±(2,2 ÷ 5,8) |
| Хромель – альюмель (ХА) | K | ТХА | -50 ÷ 1000 | ±(4,0 ÷ 9,7) |
| Платинородий (10% родия) – платина (ПП) | S | ТПП | 0 ÷ 1300 | ±(1,2 ÷ 3,6) |
| Платинородий (30% родия) – платинородий (6% родия) (ПР30/6) | B | ТПР | 300 ÷ 1600 | ±(3,2 ÷ 5,2) |
| Вольфрамрений (5% рения) – вольфрамрений (20% рения) (ВР5/20) | A | ТВР | 0 ÷ 2200 | ±(5,4 ÷ 9,7) |

По характеру термоэлектродных материалов ТЭП подразделяются на две группы: ТЭП с металлическими термоэлектродами из благородных и неблагородных металлов; ТЭП с термоэлектродами из тугоплавких соединений или их комбинаций с графитом и другими материалами. ТЭП первой группы являются наиболее распространенными, они вошли в практику технологического контроля и научно-исследовательских работ. Высокотемпературные ТЭП второй группы не распространены из-за трудности стабильности их термоЭДС во времени и недостаточная взаимозаменяемость.

1.3.2 Поправка на температуру свободных концов ТЭП.

При градуировке ТЭП температура свободных концов обычно поддерживается постоянной и равной $t_0 = \theta$ °С. При измерении температуры в практических условиях температура свободных концов, в большинстве случаев, поддерживается постоянной, но не равной θ °С. С изменением температуры свободных концов изменяется термоЭДС термоэлектрического термометра, что и вызывает необходимость введения поправки.

Если температура свободных концов отлична от нуля и равна t'_0 , то показание измерительного прибора при температуре рабочих концов, равной t , будет соответствовать генерируемой в этом случае термоЭДС (согласно 1.5):

$$E_{AB}(t, t'_0) = e_{AB}(t) - e_{AB}(t'_0). \quad (1.7)$$

Градуировочная таблица соответствует условию $t_0 = 0$:

$$E_{AB}(t, t_0) = e_{AB}(t) - e_{AB}(t_0). \quad (1.8)$$

Вычтем из (1.8) уравнение (1.7), тогда:

$$E_{AB}(t, t_0) = E_{AB}(t, t'_0) + E_{AB}(t'_0, t_0), \quad (1.9)$$

где $E_{AB}(t'_0, t_0)$ – поправка на температуру свободных концов ТЭП.

Если $t'_0 > t_0 = 0$, то поправку прибавляют к измеренному прибором значению, если $t'_0 < t_0 = 0$ то поправку отнимают от значения, показанного прибором.

Таким образом, по значению $E_{AB}(t, t_0)$ из градуировочной таблицы определяют искомую рабочую температуру t .

Чтобы в процессе измерений поправка была неизменной, места соединений свободных концов с медными проводами должны быть помещены в специальное устройство, обеспечивающее постоянство температуры, то есть свободные концы подлежат термостатированию:

а) $t_0 = 0^\circ \rightarrow$ свободные концы погружаются в пробирку с маслом, находящуюся в сосуде Дьюара с тающим льдом;

б) $t_0 \neq 0^\circ \rightarrow$ свободные концы помещают в специальные пробирки, снабженные простым автоматическим биметаллическим терморегулятором. Обычно поддерживается $t_0 = 50^\circ\text{C}$.

1.3.3 Устройство компенсации температуры (КТ)

Устройство КТ предназначено для автоматической компенсации изменения термоЭДС термоэлектрического термометра, вызванного отклонением температуры его свободных концов от градуировочной $t_0 = 0^\circ\text{C}$. Устройство КТ представляет собой мостовую схему (рисунок 1.3).

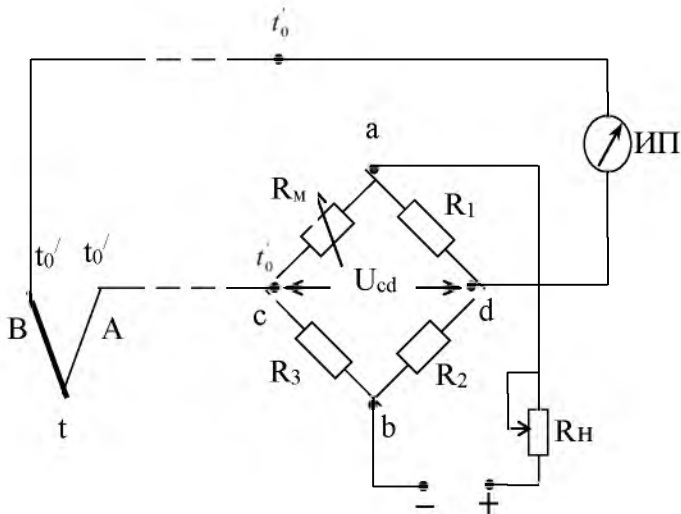


Рисунок 1.3 – Устройство КТ

Обозначения на рисунке 1.3: R_1 , R_2 , R_3 – манганиновые резисторы; R_M – медный резистор; ИП – измерительный прибор.

При $t_0 = 0\text{ }^\circ\text{C}$ мост находится в равновесии, т.е. напряжение в диагонали $U_{cd} = 0$.

Условие равновесия моста:

$$R_1 \cdot R_3 = R_2 \cdot R_M,$$

отсюда

$$R_M = (R_1 \cdot R_3) / R_2.$$

Когда $t_0 > 0 = t_0'$, увеличивается R_M , и тогда появляется U_{cd} , которое компенсирует недостающую термоЭДС на значение поправки (рисунок 1.3), т.е. $U_{cd} = E_{AB}(t_0', t_0)$. Тогда на входе измерительного прибора (ИП):

$$E_{AB}(t, t_0) = E_{AB}(t, t_0') + U_{cd}.$$

Погрешность устройства КТ равна $\pm 3\text{ }^\circ\text{C}$ в пределах изменения t_0 от 0 до $50\text{ }^\circ\text{C}$.

1.3.4 Удлиняющие термоэлектродные провода.

Для исключения влияния температуры измеряемого объекта на свободные концы ТЭП и подключаемый к ним вторичный измерительный прибор их следует удалить из зоны с переменной температурой. Целесообразно удлинять не сами термоэлектроды ТЭП, а продлевать их с помощью специальных удлиняющих проводов (рисунок 1.4), которые обычно называют термоэлектродными или компенсационными.

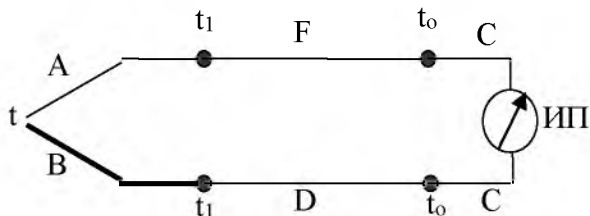


Рисунок 1.4 – Схема ТЭП с удлиняющими проводами F и D

Развиваемая в этой цепи термоЭДС:

$$E = e_{AB}(t) + e_{BD}(t_1) + e_{DC}(t_0) + e_{CF}(t_0) + e_{FA}(t_1). \quad (1.10)$$

Если принять, что все спаи имеют температуру t_1 , то (1.10) примет вид:

$$0 = e_{AB}(t_1) + e_{BD}(t_1) + e_{DC}(t_1) + e_{CF}(t_1) + e_{FA}(t_1). \quad (1.11)$$

Вычтем (1.11) из (1.10):

$$E - 0 = [e_{AB}(t) - e_{AB}(t_1)] + [e_{DF}(t_0) - e_{DF}(t_1)] = E_{AB}(t, t_1) + [e_{FD}(t_1) - e_{FD}(t_0)] = E_{AB}(t, t_1) + E_{FD}(t_1, t_0).$$

Если *термоэлектрические характеристики* термометра АВ и пары, составленной из термоэлектродных проводов FD, *одинаковы* в интервале температур от $t_0 = 0^\circ\text{C}$ до $t_1 = 100^\circ\text{C}$, то:

$$E_{AB}(t_1, t_0) = E_{FD}(t_1, t_0). \quad (1.12)$$

Тогда $E = E_{AB}(t, t_1) + E_{AB}(t_1, t_0) = E_{AB}(t, t_0)$.

Таким образом, включение в цепь ТЭП термоэлектродных проводов, подобранных в соответствии с (1.12), не создает в цепи паразитных термоЭДС и поэтому не искажает результат измерения. При этом

температуры мест соединений термоэлектродов А и В с удлиняющими проводами F и D должны быть одинаковыми, а абсолютное значение этой температуры в интервале от 0 до 100°С роли не играет.

Основные характеристики удлиняющих термоэлектродных проводов, применяемых с серийно выпускаемыми ТЭП, даны в таблице 1.5.

Таблица 1.5 – Основные технические характеристики стандартных удлиняющих термоэлектродных проводов

| Тип ТЭП | Удлиняющие термоэлектродные провода | | | Погрешность мВ |
|---------|-------------------------------------|---------------|--------------------------------|----------------|
| | Обозначение | Положительный | Отрицательный | |
| ТХК | ХК | Хромель | Копель | $\pm 0,20$ |
| ТХА | М | Медь | Константан | $\pm 0,15$ |
| ТПП | ПП | Медь | Сплав ТП (99,4%Cu + 0,6%Ni) | $\pm 0,03$ |

В некоторых случаях для ТХА, кроме указанных в таблице 1.2, применяют термоэлектродные провода с жилами из хромеля и алюмеля. Для ТВР и ТПР применяют удлиняющие термоэлектродные провода с жилами из меди и медно-никелевого сплава (98,2% Cu + 1,8% Ni).

1.3.5 Включение измерительного прибора в цепь ТЭП.

Для измерения термоЭДС ТЭП в его цепь необходимо включить измерительный прибор ИП по одной из двух схем (рисунок 1.5).

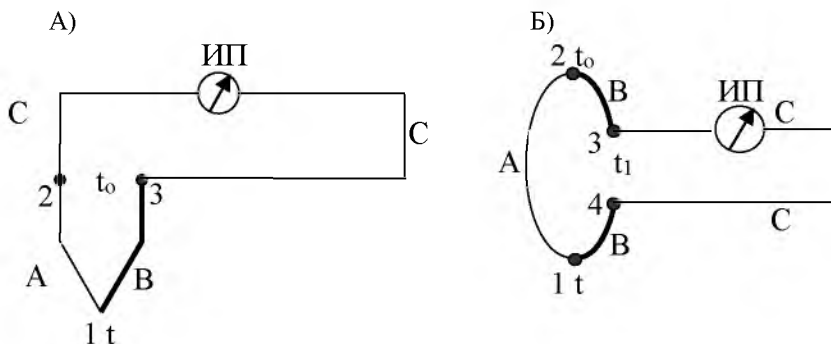


Рисунок 1.5 – Схемы включения измерительного прибора в цепь ТЭП

Обе схемы можно рассмотреть как включение в цепь измерительного прибора с помощью проводника С.

В первой схеме (рисунок 1.5, А) у ТЭП один рабочий спай - 1 и два свободных спаев - 2,3. ТермоЭДС такого замкнутого контура равна:

$$E_{ABC}(t, t_0, t_0) = e_{AB}(t) + e_{BC}(t_0) + e_{CA}(t_0). \quad (1.13)$$

Если $t = t_0$ (т.е. температуры спаев одинаковы), то:

$$E_{ABC}(t_0, t_0, t_0) = 0 = e_{AB}(t_0) + e_{BC}(t_0) + e_{CA}(t_0), \quad (1.14)$$

так как

$$e_{BC}(t_0) + e_{CA}(t_0) = e_{BA}(t_0),$$

тогда

$$E_{ABC}(t, t_0, t_0) = e_{AB}(t) + e_{BA}(t_0) = e_{AB}(t) - e_{AB}(t_0). \quad (1.15)$$

Уравнение (1.15) есть *основное уравнение ТЭП*.

Во второй схеме (рисунок 1.5, Б) у ТЭП рабочий спай -1, свободный -2, два нейтральных -3,4. Концы 3 и 4 должны иметь одну и ту же температуру t_1 . При постоянной температуре t_1 :

$$E_{ABC}(t, t_1, t_0) = e_{AB}(t) + e_{BC}(t_1) + e_{CB}(t_1) + e_{BA}(t_0). \quad (1.16)$$

Так как $e_{BC}(t_1) = -e_{CB}(t_1)$ и $e_{BA}(t_0) = -e_{AB}(t_0)$, получим:

$$E_{ABC}(t, t_1, t_0) = e_{AB}(t) - e_{AB}(t_0) \quad (1.17)$$

Уравнение (1.17) есть *основное уравнение ТЭП*.

Таким образом, несмотря на отличие схем включения ИП в цепь ТЭП, термоЭДС, развиваемая термоэлектрическими термометрами, в обоих случаях будет одинакова, если будут одинаковы термоэлектроды А и В, а также температуры рабочих и свободных концов.

Так же, как показано выше, термоЭДС термометра не изменяется от введения в его цепь нового проводника С, если температуры концов проводника одинаковы.

1.3.6 Нормальный термоэлектрод.

Для оценки свойств ТЭП, составленных из различных пар разнородных термоэлектродов, достаточно знать термоЭДС, развиваемые термоэлектродными парами в паре с одним из термоэлектродов, называемым *нормальным*. В качестве нормального термоэлектрода стандарт предусматривает электрод из чистой платины.

Если известны термоЭДС различных термоэлектродных материалов А, В, С, ..., N в паре с платиновым П, то на основании закона Вольта можно

определить термоЭДС любой комбинации этих термоэлектродов между собой для определенных температур рабочего и свободных концов.

Пусть известны термоЭДС двух проводников А и В по отношению к платиновому термоэлектроду П при температуре рабочего спая - t° и свободных концов - t_0° : термоэлектрод А в паре с нормальным создают $E_{АП}(t, t_0)$; термоэлектрод В в паре с нормальным создают $E_{ВП}(t, t_0)$.

Основное уравнение для этих ТЭП:

$$E_{АП}(t, t_0) = e_{АП}(t) - e_{АП}(t_0) \quad (1.18)$$

и

$$E_{ВП}(t, t_0) = e_{ВП}(t) - e_{ВП}(t_0). \quad (1.19)$$

Вычтем (1.19) из (1.18):

$$\begin{aligned} E_{АП}(t, t_0) - E_{ВП}(t, t_0) &= [e_{АП}(t) - e_{ВП}(t)] - [e_{АП}(t_0) - e_{ВП}(t_0)] = \\ &= [e_{АП}(t) + e_{ПВ}(t)] - [e_{АП}(t_0) + e_{ПВ}(t_0)] = e_{АВ}(t) - e_{АВ}(t_0) = E_{АВ}(t, t_0). \end{aligned}$$

$$\text{Отсюда} \quad E_{АВ}(t, t_0) = E_{АП}(t, t_0) - E_{ВП}(t, t_0). \quad (1.20)$$

Из выражения (1.20) следует, если известна термоЭДС двух проводников А и В в паре с третьим – нормальным П, то можно расчетным путем определить значение термоЭДС ТЭП, составленного из двух термоэлектродов А и В.

Положительное значение $E_{АВ}(t, t_0)$ в формуле (1.20) свидетельствует о том, что термоэлектрод А в паре с В является положительным термоэлектродом, а отрицательное значение $E_{АВ}(t, t_0)$ указывает, что термоэлектрод А является отрицательным.

В справочниках можно найти термоЭДС различных материалов в паре с платиновым при $t = 100^\circ\text{C}$ и $t = 0^\circ\text{C}$.

Рассмотренный способ определения термоЭДС различных материалов находит применение при комплектовании ТЭП из неблагородных термоэлектродных материалов.

1.4 Средства измерения сигналов ТЭП

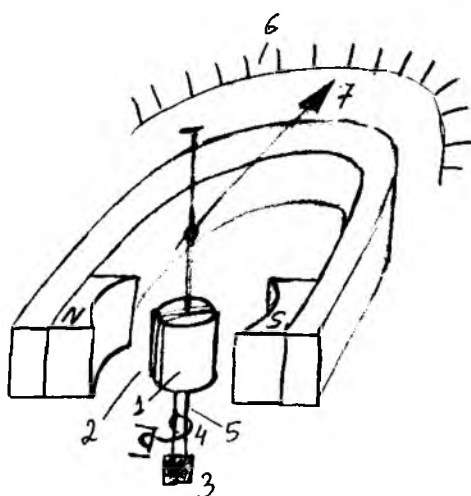
Вторичные приборы, работающие в комплексе с ТЭП:

- а) милливольтметры магнитоэлектрической системы;
- б) потенциометры;
- в) нормирующие преобразователи.

1.4.1 Милливольтметры.

Магнитоэлектрические милливольтметры широко применяются для измерения температур в комплекте с термоэлектрическими термометрами, а также с другими преобразователями.

Принцип действия и основы теории. Магнитоэлектрические милливольтметры основаны на использовании сил взаимодействия между постоянным током, протекающим по проводнику (обмотки подвижной рамки), и магнитным полем постоянного неподвижного магнита. Сила, действующая на проводник, направлена всегда нормально к направлению тока и к направлению магнитного поля.



Обозначения на рисунке 1.6:

1 – цилиндрический сердечник из мягкой стали; 2 – рамка; NS – постоянный магнит; 3 – подпятники; 4 – спиральные пружинки; 5 – kern (ось); 6 – шкала прибора; 7 – стрелка. Спиральные пружинки создают противодействующий момент повороту рамки. Они крепятся одним концом к оси 5, другим к неподвижной части прибора. Эти пружинки являются токопроводящими элементами рамки.

Рисунок 1.6 – Схема милливольтметра

Рамка, закрепленная на кернах, изготавливается как с вертикальной, так и с горизонтальной осью вращения.

Рамка – прямоугольник длиной l и шириной $2r$, состоит из n витков тонкой медной проволоки, скрепленной между собой лаком. Благодаря сердечнику 1 (рисунок 1.6), расположенному внутри рамки, она всегда оказывается под действием равномерного и радиального магнитного поля.

Тогда независимо от угла поворота рамки, плоскость ее оказывается параллельной вектору магнитной индукции B , поэтому при протекании по рамке электрического тока I , на подвижную систему действует магнитоэлектрический момент $M_{МЭ} = 2rIBl$.

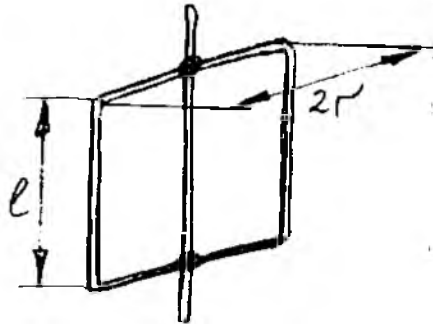


Рисунок 1.7 – Рамка магнитоэлектрического милливольтметра

Противодействующий момент, создаваемый спиральной пружинкой, равен:

$$M_{\text{пр}} = W\varphi,$$

где W – удельный противодействующий момент,

φ – угол поворота рамки.

При некотором угле поворота φ :

$$M_{\text{пр}} = M_{\text{МЭ}},$$

тогда $W\varphi = 2rIBl$,

отсюда $\varphi = 2rIBl / W = S_I I$,

где S_I – чувствительность измерительного механизма к току (рад/с).

Тогда угол поворота рамки:

$$\varphi = S_I I = S_I U / R_m = S_U U,$$

где $S_U = S_I / R_m = \varphi / U$ – чувствительность измерительного механизма к напряжению;

R_m – внутреннее сопротивление прибора.

1.4.2 Измерение термоЭДС милливольтметром.

Схема подключения милливольтметра к ТЭП и измерения термоЭДС милливольтметром представлена на рисунке 1.8.

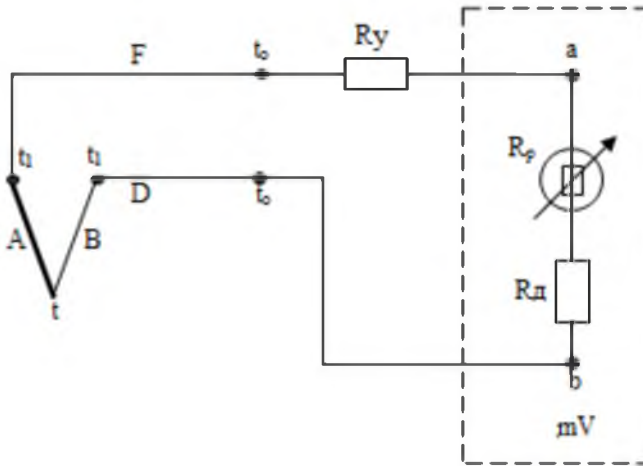


Рисунок 1.8 – Схема измерения термоЭДС милливольтметром (mV)

Обозначения на схеме: R_y – сопротивление уравнивательной катушки; R_p – сопротивление рамки; R_d – сопротивление добавочной катушки; $R_m = R_p + R_d$ – внутреннее сопротивление милливольтметра; $R_{вн} = (R_{AB} + R_{FD} + R_c + R_y)$ – внешнее по отношению к зажимам а, b прибора сопротивление цепи.

$$I = \frac{E_{AB}(t, t_o)}{R_m + R_{вн}} ; \quad U_{ab} = I \cdot R_m = E_{AB}(t, t_o) - I \cdot R_{вн} .$$

Тогда, измеряемое милливольтметром напряжение всегда меньше, чем э.д.с. в цепи на значение $I \cdot R_{вн}$, обусловленное протеканием во внешней цепи тока.

Сведение к нулю $I \cdot R_{вн}$ невозможно, т.к. принципиально невозможно непосредственное измерение э.д.с. милливольтметром.

Однако, при соблюдении определенных условий, можно с некоторой погрешностью принять, что показания милливольтметра однозначно зависят от развиваемой в цепи термоЭДС:

$$\varphi = S_1 \cdot I \Rightarrow \varphi = S_1 \cdot \frac{E_{AB}(t, t_o)}{R_m + R_{вн}} . \quad (1.21)$$

Если $R_m + R_{вн} = \text{const}$, то между показаниями φ и $E_{AB}(t, t_o)$ будет однозначная зависимость, и шкалу милливольтметра можно было бы

градуировать в градусах, соответствующих термоЭДС для данного термопреобразователя АВ.

Но R_m и $R_{вн}$ изменяются от температуры окружающей среды, а значит появляется погрешность измерения.

Покажем, как уменьшить эту погрешность. Поскольку:

$$U_{ab} = I \cdot R_M = \frac{E_{AB}(t, t_0)}{1 + \frac{R_{вн}}{R_M}}, \quad (1.22)$$

получается, чем меньше $R_{вн}/R_m$ по сравнению с единицей, тем в меньшей мере изменение этого отношения, вызванного, например, изменением температуры окружающей среды, сказывается на линейной зависимости между U_{ab} и $E_{AB}(t, t_0)$.

Отношение $R_{вн}/R_m$ уменьшится за счет увеличения $R_m = R_p + R_d$. Так как R_p – медная проволока, то R_m можно увеличить только за счет увеличения R_d – манганиновая катушка. Однако, значительное увеличение R_m приводит к уменьшению чувствительности S_U .

R_m , обычно, равно 100—500 Ом, а $R_p/R_m \leq 1/3$, что значительно уменьшает температурный коэффициент прибора. $R_{вн}$ стандартизировано 0,6—25 Ом, указывается на шкале милливольтметра.

Таким образом, использование градусной шкалы милливольтметра возможно, если градуировка ТЭП соответствует градуировке, указанной на шкале. При этом необходимо сопротивление внешней линии подогнать к $R_{вн}$, указанной на шкале, с помощью подгоночного сопротивления R_y .

Если шкала милливольтметра в mV, то она наносится без учета $R_{вн}$ и показания милливольтметра равно U_{ab} , тогда по известным $R_{вн}$ и R_m определяют $E_{AB}(t, t_0)$ – термоЭДС для ТЭП любой градуировки, тогда из таблиц определяют измеряемую температуру.

Промышленностью выполняются стационарные милливольтметры с градусной шкалой класса точности 0,5; 1,0; 1,5; 2,0. Переносные милливольтметры выполняются с градусной и милливольтровой шкалой классов точности 0,2; 0,5; 1,0.

1.4.3 Потенциометры.

1.4.3.1 Компенсационный метод измерения.

Принцип действия потенциометров основан на *компенсационном методе измерения*, заключающемся в уравнивании (компенсации) неизвестного напряжения известным падением напряжения, создаваемым током от дополнительного источника (рисунок 1.9).

Контур I компенсационный содержит дополнительный источник E_B и реохорд R_{ab} (компенсационный резистор).

Контур II измерения включает в себя ТЭП, термоЭДС $E_{AB}(t, t_0)$ которого измеряется, и высокочувствительный гальванометр, выполняющий функции нуль-индикатора (НИ), а также часть реохорда R_{ac} от точки a до подвижного контакта движка реохорда c .

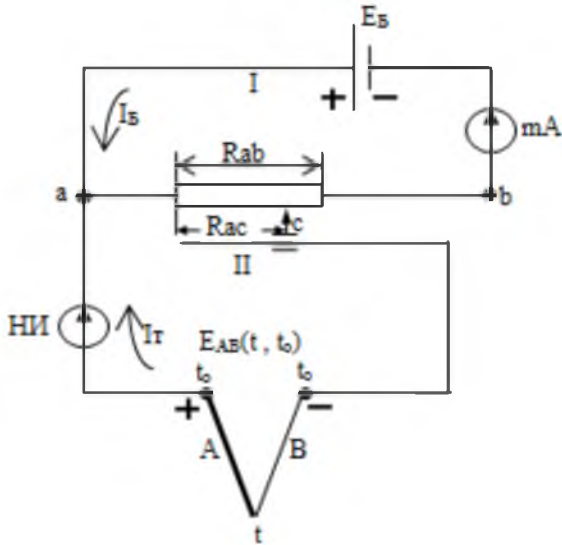


Рисунок 1.9 – Схема компенсационного метода измерения

ТермоЭДС $E_{AB}(t, t_0)$ включена навстречу E_B так, что токи от обоих источников на участке R_{ac} идут в одном направлении: I_B – рабочий ток, I_T – ток для контура II при некотором положении движка c .

По закону Кирхгофа для контура II:

$$E_{AB}(t, t_0) = I_T \cdot R_{вн} + I_T \cdot R_{НИ} + I_T \cdot R_{ac} + I_B \cdot R_{ac},$$

где $R_{вн}$, $R_{НИ}$ – сопротивления внешних проводов, включая внутренние сопротивления ТЭП и нуль-индикатора.

В контуре, где расположен источник измеряемой ЭДС, ток $I_T = 0$ и падение напряжения на участке R_{ac} служит мерой измеряемой ЭДС:

$$E_{AB}(t, t_0) = I_B R_{ac}. \quad (1.23)$$

Компенсирующее напряжение $I_B \cdot R_{ac}$ можно изменять двумя способами:

- а) поддержать $I_B = \text{const}$, $R_{ac} = \text{var}$;
- б) $R_{ac} = \text{const}$, $I_B = \text{var}$.

Наиболее распространена схема потенциометра по 1 способу (с постоянной силой рабочего тока).

1.4.3.2 Схема потенциометра с постоянной силой рабочего тока.

Схема потенциометра, представленная на рисунке 1.10, отличается от схемы на рисунке 1.9 включением дополнительного контура III – для контроля за постоянством рабочего тока I_B .

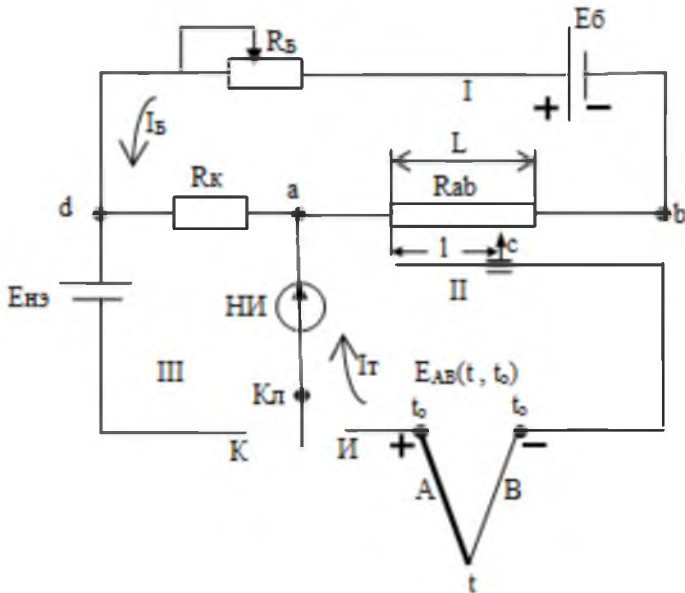


Рисунок 1.10 – Схема потенциометра с постоянной силой рабочего тока

Искомая термоЭДС:

$$E_{AB}(t, t_o) = I_B \cdot R_{ac} = \frac{E_{H3} \cdot R_{ac}}{R_K} .$$

$E_{H3} = 1.0186 \text{ В}$; $R_K = 509,3 \text{ Ом}$; $I_B = 2 \text{ мА}$.

При равномерной намотке реохорда $\frac{R_{ac}}{R_{ab}} = \frac{l}{L}$, отсюда $R_{ac} = \frac{R_{ae}}{L} \cdot l$ и $k = I_B \frac{R_{ae}}{L}$, тогда:

$$E_{AB}(t, t_0) = k \cdot l . \quad (1.24)$$

Таким образом, измерение термоЭДС $E_{AB}(t, t_0)$ сводится к измерению длины l участка реохорда, которая проградуирована в единицах напряжения.

Такие потенциометры имеют высокий класс точности, вплоть до 0,0005.

1.4.3.3 Схема потенциометра с переменной силой рабочего тока.

В схеме потенциометра, представленной на рисунке 1.11, $E_{AB}(t, t_0)$ компенсируется падением напряжения $I_B R_{ab}$ на постоянном и известном сопротивлении R_{ab} путем изменения I_B с помощью R_B .

Движок R_B перемещается до тех пор, пока НИ не покажет нуль, при этом отсчитывается I_B по шкале миллиамперметра. Получается, что $E_{AB}(t, t_0)$ зависит от точности миллиамперметра, поэтому этот потенциометр уступает по точности предыдущему.

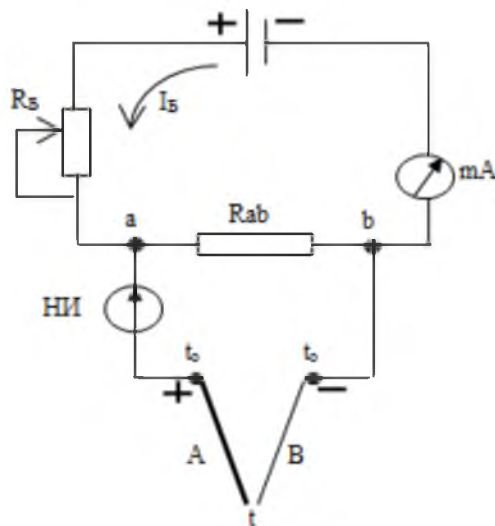


Рисунок 1.11 – Схема потенциометра с переменной силой рабочего тока

1.4.4 Нормирующие преобразователи термоЭДС.

Нормирующие преобразователи (НП) термоЭДС предназначены для преобразования сигнала ТЭП в унифицированный сигнал постоянного тока 0—5 мА (рисунок 1.12). В основу работы НП положен компенсационный метод измерения термоЭДС по схеме с переменной силой рабочего тока.

Обозначения на схеме:

I – контур измерения: КМ – корректирующий мост (R_1, R_2, R_3 – манганиновые резисторы, R_M – медный); Y_1 – усилитель с токовым выходом, который выполняет функции НИ (УМ – магнитный усилитель; УП – полупроводниковый усилитель);

II – контур компенсации: R_{oc} и Y_2 – усилитель обратной связи (ОС) с глубокой отрицательной ОС по выходному току усилителя I_{oc} , который является рабочим током контура II. Компенсирующее напряжение $U_{oc} = I_{oc} \cdot R_{oc}$. Со стороны контура I к резистору R_{oc} подводится сигнал $U_{oc} = E_{AB}(t, t_0') + U_{cd}$.

$U_{cd} = E_{AB}(t_0', t_0)$ – равно поправке на температуру свободных концов.

Тогда $E_{AB}(t, t_0) = E_{AB}(t, t_0') + U_{cd}$.

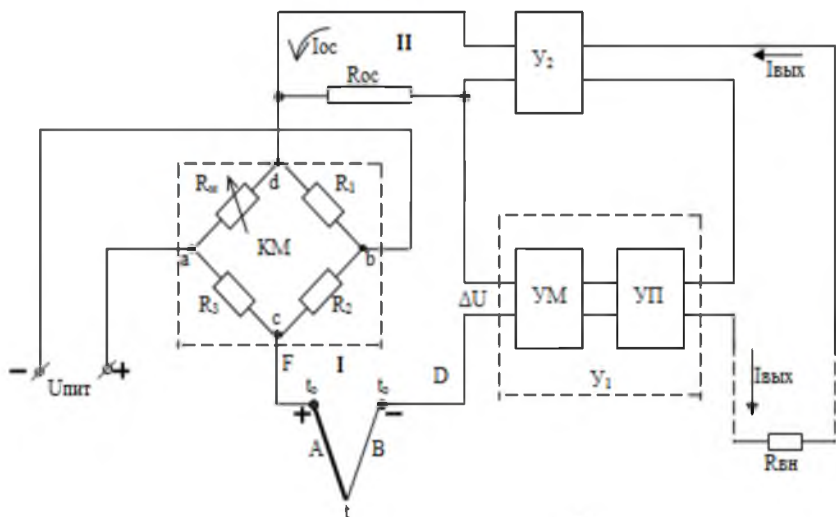


Рисунок 1.12 – Схема нормирующего преобразователя термоЭДС

Измеряемое $E_{AB}(t, t_0)$ сравнивается с U_{oc} . Небаланс $\Delta U = E_{AB}(t, t_0) - U_{oc}$ подается на Y_1 , где этот сигнал постоянного тока ΔU преобразуется в УМ в

сигнал переменного тока, затем в УП усиливается и преобразуется опять в сигнал постоянного тока.

U_1 создает ток $I_{\text{вых}}$, который поступает во внешнюю цепь $R_{\text{вн}}$ и далее через делитель – в усилитель ОС U_2 . $R_{\text{вн}} = 2,5 \text{ кОм}$.

Токи на выходе и входе УОС (U_2) строго пропорциональны между собой:

$$U_{\text{ос}} = I_{\text{ос}} \cdot R_{\text{ос}} = K_{\text{ос}} \cdot I_{\text{вых}} \cdot R_{\text{ос}}, \quad (1.25)$$

где $K_{\text{ос}}$ – коэффициент передачи УОС (U_2).
Для усилителей с ОС:

$$\Delta I_{\text{вых}} = K_y \cdot (\Delta U - K_{\text{ос}} \cdot R_{\text{ос}} \cdot \Delta I_{\text{вых}}), \quad (1.26)$$

где K_y – коэффициент передачи U_1 .

$$\Delta I_{\text{вых}} = \frac{K_y}{1 + K_y \cdot K_{\text{ос}} \cdot R_{\text{ос}}} \cdot \Delta U = k \cdot \Delta U_x, \quad (1.27)$$

где k – коэффициент передачи НП.

Выходной ток усилителя U_2 – $I_{\text{ос}}$ изменяется и изменяет $U_{\text{ос}}$ до тех пор, пока ΔU не достигнет некоторой малой величины δU , называемой статической ошибкой компенсации. Наличие δU приводит к тому, что в контуре I проходит некомпенсированный ток. При этом, чем больше измеряемая термоЭДС, тем больше этот ток.

В зависимости от диапазона входного сигнала НП, работающие с ТЭП, имеют класс точности 0,6—1,5.

1.5 Термопреобразователи сопротивления (ТПС)

Измерение температуры с помощью ТПС основано на свойстве металлов и полупроводников *изменять свое электрическое сопротивление с изменением температуры*: если известна градуировочная характеристика (функция преобразования) $R_t = f(t)$, то, измерив R_t , можно определить температуру среды, в которую он погружен.

ТПС надежно измеряют температуру в пределах $-260 \div +1100 \text{ }^\circ\text{C}$.

Металлические ТПС: для изготовления *стандартизованных* ТПС применяют *платину* (ТСП) и *медь* (ТСМ).

К ТПС из металлического проводника предъявляются требования:

- 1) стабильность градуировочной характеристики;
- 2) взаимозаменяемость изготавливаемых ТПС;
- 3) линейность функции $R(t) = f(t)$ (желательно);

- 4) высокий температурный коэффициент электрического сопротивления α ;
- 5) большое удельное сопротивление ρ ;
- 6) невысокая стоимость.

Чем чище металл, тем в большей степени он отвечает указанным требованиям.

Платина – наилучший материал для ТПС: $\alpha = 3,94 \cdot 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$; $\rho = 0,1 \cdot 10^{-6} \text{ Ом}\cdot\text{м}$; диапазон измерения $\Delta t^\circ = -260 \div +1100 \text{ } ^\circ\text{C}$. ТПС из Pt – наиболее точные первичные преобразователи диаметром проволоки $0,05 \div 0,5 \text{ мм}$. Они используются в качестве рабочих, образцовых, эталонных термометров.

Медь – легко получается в чистом виде, недорогой металл, зависимость $R_t = f(t)$ линейна в широком диапазоне температур, $\alpha = 4,26 \cdot 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$; диапазон измерения $\Delta t^\circ = -50 \div +200 \text{ } ^\circ\text{C}$. При $t^\circ > 200^\circ\text{C}$ медь активно окисляется и поэтому не используется.

Никель и железо: диапазон измерения $\Delta t^\circ = -50 \div +250 \text{ } ^\circ\text{C}$; высокий α , однако эти ТПС широко не применяются, т.к. градуировочная характеристика нелинейна, а главное – нестабильна и невоспроизводима, поэтому ТПС из никеля и железа не стандартизированы.

Конструкция металлических ТПС: тонкая проволока из платины или меди наматывается на каркас из керамики, слюды, кварца и т.п. Каркас с проволокой покрывают слюдой. Каркас помещают в алюминиевую защитную гильзу. Гильзу помещают во внешний стальной замкнутый чехол, который устанавливают на ОИ с помощью штуцера.

Полупроводниковые ТПС: диапазон измерения $\Delta t^\circ = -100 \div +300^\circ\text{C}$. Используют полупроводники: оксид магния, кобальта, марганца, титана, меди, кристаллы германия.

Преимущества полупроводниковых ТПС:

- 1) большой отрицательный коэффициент α ;
- 2) очень чувствительны к изменениям температуры;
- 3) значительное удельное сопротивление.

Недостатки полупроводниковых ТПС:

- 1) значительная нелинейность $R_t = f(t)$ (экспоненциальная зависимость);
- 2) невоспроизводимость градуировочной характеристики, поэтому полупроводниковые ТПС даже одного и того же типа имеют индивидуальные градуировки и не взаимозаменяемы. Исключением являются германиевые ТПС $\Delta t^\circ = 30\text{—}90 \text{ } ^\circ\text{K}$.

ТПС из полупроводников редко используются для измерения температуры. Они широко используются в системах температурной сигнализации, вследствие присущего им релейного эффекта – скачкообразного изменения сопротивления при достижении определенной температуры. Также ТПС из полупроводников используются в качестве

чувствительных элементов в различных газоаналитических автоматических приборах. Чувствительные элементы из полупроводников выполняются в виде цилиндров, шайб, бусинок малых размеров.

1.6 Средства измерения, работающие в комплекте с ТПС

Средства измерения, работающие в комплекте с ТПС:

- мосты (уравновешенные и неуравновешенные);
- логометры;
- нормирующие преобразователи.

1.6.1 Уравновешенные мосты.

В уравновешенных мостах (рисунок 1.13) используется *нулевой метод измерения*. С помощью неавтоматических уравновешенных мостов, используемых в лабораторных условиях, измеряют сопротивление от 0,5 до 10^7 Ом, производят градуировку ТПС и измеряют температуру.

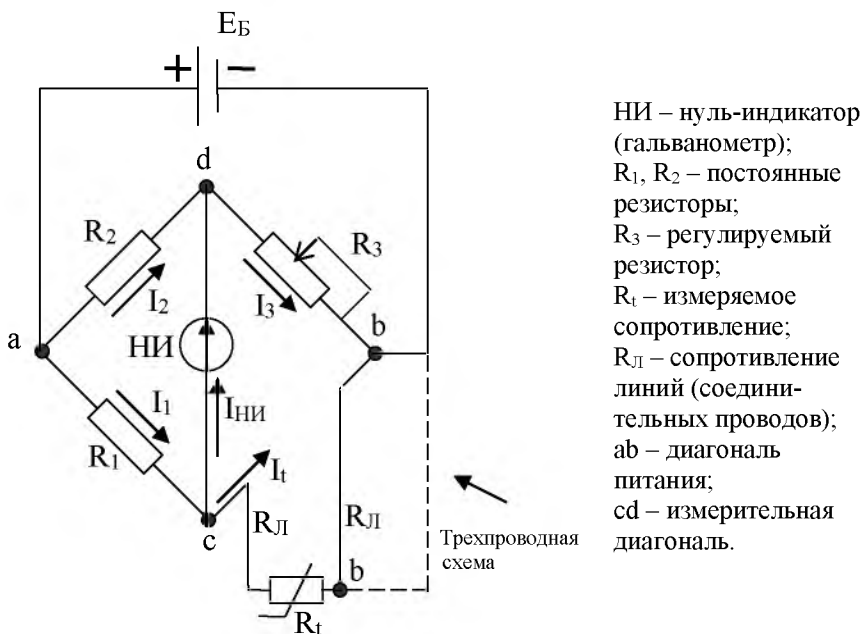


Рисунок 1.13 – Схема уравновешенного моста

Когда мост уравновешен, то $I_{НИ} = 0$ и $R_2 \cdot (R_t + 2 \cdot R_{Л}) = R_1 \cdot R_3$,

отсюда

$$R_t = \frac{R_1 \cdot R_3}{R_2} - 2 \cdot R_{л} \quad , \quad (1.28)$$

где $R_1/R_2 = \text{const}$; $R_3 - \text{var}$; $R_{л}$ – должно быть const , однако $R_{л}$ изменяется с изменением температуры окружающей среды, поэтому R_t искажается, появляется погрешность от температуры окружающей среды.

Этот недостаток устраняется при трехпроводной схеме включения ТПС к мосту (рисунок 1.12). Тогда условие равновесия моста $R_1 \cdot (R_3 + R_{л}) = R_2 \cdot (R_t + R_{л})$. Отсюда

$$R_t = \frac{R_1}{R_2} \cdot (R_3 + R_{л}) - R_{л} \quad . \quad (1.29)$$

Если сделать мост симметричным ($R_1 = R_2$), то $R_t = R_3$, т.е. R_t не содержит $R_{л}$, а значит R_t не зависит от температуры окружающей среды.

Недостаток уравновешенных мостов: наличие переходного сопротивления контакта в регулируемом плече R_3 . Чтобы устранить недостаток – нужно поместить R_3 сразу в двух плечах, а подвижный контакт в измерительную диагональ, тогда при уравнивании моста изменяется сопротивление сразу двух плеч, а переходное сопротивление контакта не оказывает влияния на результат измерения, т.к. $I_{НИ} = 0$.

Достоинство – независимость от напряжения питания, минимальное значение которого определяется чувствительностью НИ.

1.6.2 Неуравновешенные мосты (НУМ).

НУМ (рисунок 1.14) не требуют уравнивания тока, проходящего в его измерительной диагонали. *Значение этого тока является мерой подсоединенного к мосту измеряемого сопротивления.*

На рисунке 1.14 приняты следующие обозначения:

R_1, R_2, R_3 – постоянные резисторы;

R_B – реостат в диагонали питания;

R_t – измеряемое сопротивление;

R_K – контрольное сопротивление;

I_D – ток, через измеряемую диагональ;

Π – переключатель.

$$I_D = U_{ab} \cdot \frac{R_2 \cdot R_t - R_1 \cdot R_3}{M}, \quad \text{где} \quad M = f(R_1, R_2, R_3, R_t) = \text{const} .$$

Если $U_{ab} = \text{const}$, то $I_D \sim R_t$.

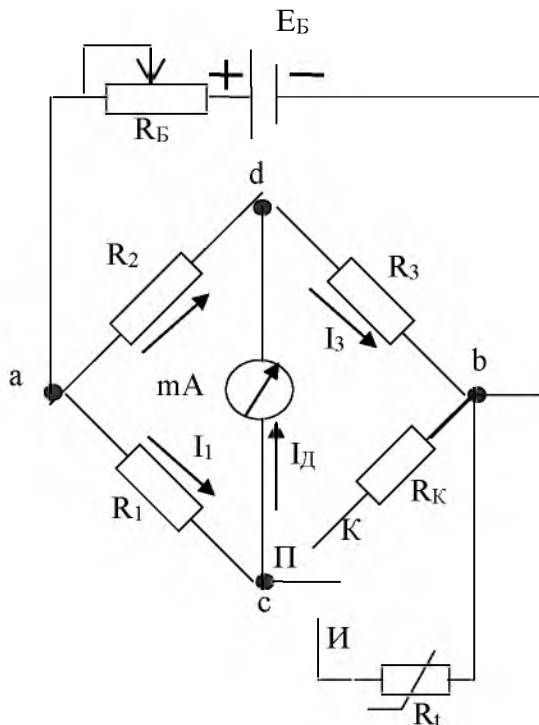


Рисунок 1.14 – Схема неуравновешенного моста

1) Для контроля $U_{ab} = \text{const}$ $\Pi \rightarrow K$ (режим контроля), тогда стрелка миллиамперметра должна установиться на вполне определенной отметке (можно отметить цветной линией). Если нет, то изменяется R_B и тогда I_d установится на контрольной отметке.

2) $\Pi \rightarrow И$ (режим измерения), затем снимается значение I_d , потом определяется R_t , а по нему определяется значение температуры.

НУМ редко используются для измерения температуры. Они широко используются в газоанализаторах, где в качестве чувствительного элемента используются нагреваемые электрическим током металлические или чаще полупроводниковые резисторы.

1.6.3 Логометры.

Рассматриваемые ниже приборы магнитоэлектрической системы, называемые логометрами (от греческого «логос» – отношение), широко

используются в практике технологического контроля для измерения и записи температуры в комплекте с ТПС. Схема логометра магнитоэлектрической системы в комплекте с ТПС представлена на рисунке 1.15.

Измерительный механизм логометров состоит из двух рамок, помещенных в воздушный зазор между полюсами постоянного магнита и сердечником. Конструктивно выполнено так, что зазор неравномерный, по оси X-X он максимальный и убывает к концам полюсных наконечников.

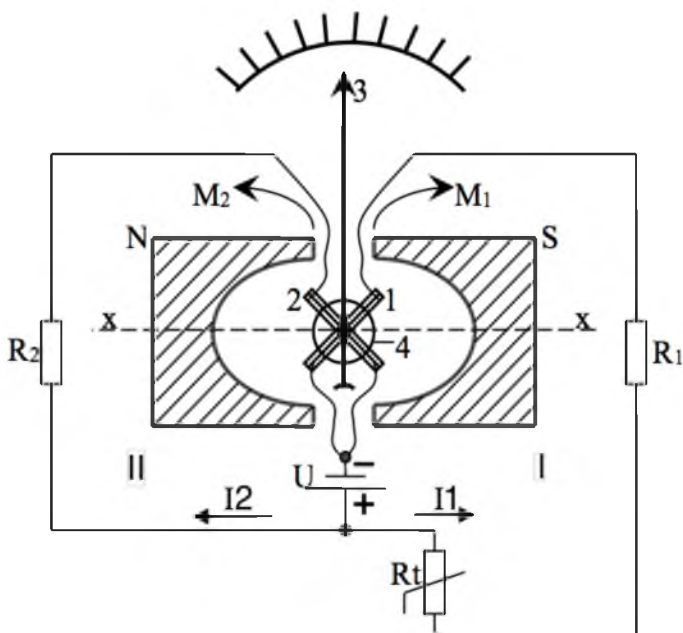


Рисунок 1.15 – Схема логометра магнитоэлектрической системы

Обозначения на схеме (рисунок 1.15):

1,2 – рамки из медных изолированных проволок (r_1 , r_2);

3 – стрелка прибора;

1,2,3 насажены на общую ось;

4 – цилиндрический сердечник из мягкой стали.

R_1 , R_2 – добавочные манганиновые резисторы;

R_t – сопротивление термометра.

Магнитные моменты $M_1 = c \cdot I_1 \cdot B_1$; $M_2 = c \cdot I_2 \cdot B_2$,

где $c = \text{const}$ – коэффициент, зависящий от геометрии рамок;

B_1 , B_2 – магнитная индукция.

Уравновешивание момента M_1 происходит за счет момента M_2 .

$$M_1 = M_2 \Rightarrow c \cdot I_1 \cdot B_1 = c \cdot I_2 \cdot B_2 \Rightarrow \frac{I_2}{I_1} = \frac{B_1}{B_2} = \Psi(\varphi) \Rightarrow \varphi = F\left(\frac{I_2}{I_1}\right).$$

То есть угол поворота подвижной системы φ (или показания логометра) определяется отношением двух токов.

$$I_2 = \frac{U}{r_2 + R_2}, \quad I_1 = \frac{U}{Rt + r_1 + R_1}$$

где $r_1, r_2, R_1, R_2 = const \Rightarrow \varphi = F(Rt)$.

Таким образом, логометр измеряет Rt , а значит температуру. Чтобы уменьшить влияние температуры окружающей среды последовательно подключаются резисторы R_1, R_2 из манганина, сопротивление которых намного больше, чем сопротивления рамок r_1, r_2 . Но это уменьшает чувствительность логометра, т.к. уменьшаются токи через r_1, r_2 .

1.6.4 Симметричный неравновесный мост.

Для увеличения чувствительности и уменьшения температурного коэффициента прибора используют *схему симметричного неравновесного моста*, в измерительную диагональ которого включают рамки логометра.

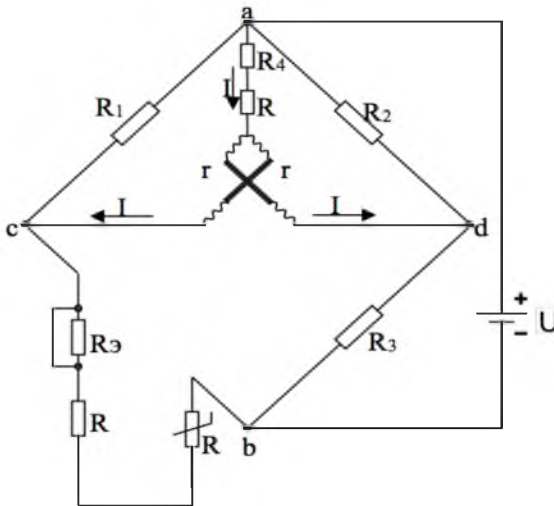


Рисунок 1.16 – Схема симметричного неравновесного моста

Обозначения на схеме (рисунок 1.16):

$R_1 = R_2$; $R_3 = R_t$, при R_t , соответствующему среднему значению измеряемой температуры по шкале логометра.

R_5 – сопротивление для изменения диапазона измерения;

R_4 – медное сопротивление для температурной компенсации;

R_3, R_y – эквивалентное и уравнительное сопротивления для подгонки сопротивления соединительной линии.

Если уравнять сопротивления плеч, в которых находятся R_3 и R_t , то потенциалы точек c и d будут одинаковы (благодаря симметрии схемы), а токи I_1 и I_2 , протекающие в рамках 1 и 2 будут равны и противоположны.

При увеличении сопротивления R_t термометра потенциал точки c повышается, а потенциал точки d понижается. Соответственно ток I_2 уменьшается, а ток I_1 увеличивается. Когда сопротивление термометра уменьшается, то I_2 увеличивается, а I_1 уменьшается. Таким образом, при изменении сопротивления термометра происходит одновременное изменение токов в обеих рамках логометра. Изменения этих токов имеют разные знаки, благодаря этому чувствительность такой схемы выше, чем у несимметричной схемы.

В эту же схему возможно подключение ТПС как по двухпроводной, так и по трехпроводной схеме включения.

По данной схеме логометр класса точности 1,5 будет иметь дополнительную погрешность не более $\pm 0,75\%$ на каждые $10\text{ }^\circ\text{C}$ изменения температуры окружающей среды.

Логометры бывают показывающими, самопишущими, многоточечными. Промышленные логометры выпускаются классов точности 0,5; 1; 1,5; 2; 2,5.

1.6.5 Нормирующие преобразователи ТПС.

Для введения информации с ТПС в ЭВМ или в систему автоматического регулирования (САУ) используют нормирующие преобразователи (НП), формирующие на своем выходе сигнал постоянного тока 0–5 мА.

Принцип действия этого НП аналогичен НП, работающему в комплекте с ТЭП. Отличие заключается в том, что вместо КМ (корректирующий мост) используется ИМ (измерительный неравновесный мост).

В одно плечо ИМ по трехпроводной схеме подключен ТПС R_t . Все остальные сопротивления – манганиновые.

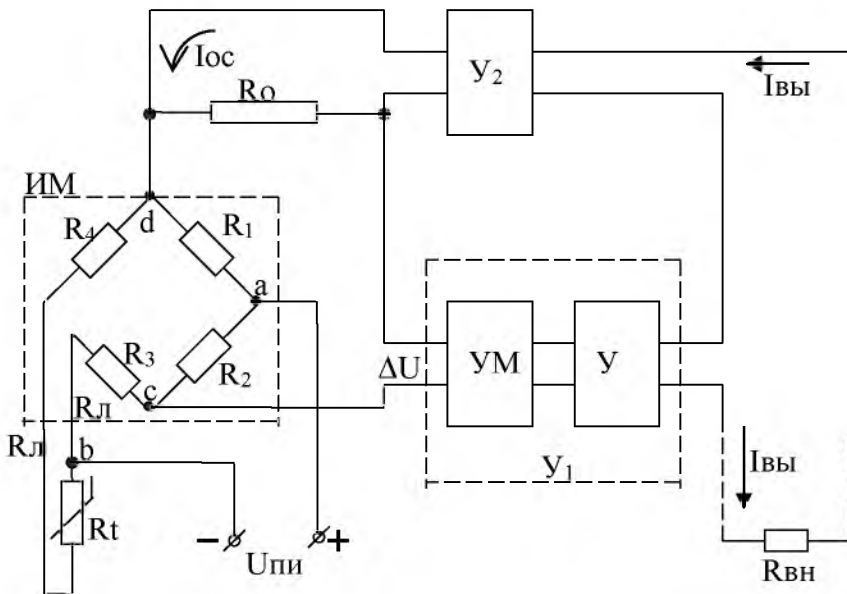


Рисунок 1.17 – Схема нормирующего преобразователя ТПС

$R_{л}$ – для подгонки сопротивлений соединительных проводов к номинальному значению.

$I_{вых} = k \cdot U_{сд}$, где k – коэффициент пропорциональности.

$U_{сд} = k_M \cdot R_t$, где k_M – коэффициент преобразования моста.

Тогда $I_{вых} = k \cdot k_M \cdot R_t$. Получается, что токовый сигнал НП ~ R_t .

Классы точности НП ТПС 0,6—1,5.

1.7 Измерение теплового излучения

Все физические тела, температура которых больше абсолютного нуля, испускают тепловые лучи. *Тепловое излучение* – электромагнитное излучение, испускаемое веществом за счет его внутренней энергии.

Интенсивность теплового излучения резко убывает с уменьшением температуры тел. Большинство твердых и жидких тел имеют сплошной спектр излучения, т.е. излучают волны всех длин λ .

Видимое человеком излучение (свет): $\lambda = 0,40-0,75$ мкм.

Инфракрасный (невидимый свет): $\lambda = 0,75-400$ мкм. Далее радиоволновой диапазон.

Ультрафиолет (невидимый): $\lambda < 0,40$ мкм. Далее рентгеновские и гамма-лучи.

Средства измерения, определяющие температуру тел по их тепловому излучению, называют *пирометрами излучения*. Пирометры используются для измерения температуры в диапазоне 300–6000 °С. Для измерения температур больше 3000 °С пирометры являются практически единственными СИ, т.к. они бесконтактны. Теоретически верхний предел измерения пирометров неограничен. В пирометрах используется в основном видимый свет и инфракрасный диапазон.

Измерение температуры тел по их тепловому излучению основывается на закономерностях, полученных для *абсолютно черного тела*. Если на внешнюю поверхность тела падает поток лучистой энергии Φ , то он частично поглощается Φ_n , отражается $\Phi_{от}$ и пропускается $\Phi_{пр}$. Соотношение между этими потоками зависит от свойств тела и в частности, от состояния его поверхности (степени шероховатости, цвета, температуры). Если тело поглощает весь падающий на него лучистый поток, то *коэффициент поглощения* его $\alpha = \frac{\Phi_n}{\Phi} = 1$ и такое тело называют *абсолютно черным*.

Реальные тела не являются абсолютно черными, и лишь некоторые из них по оптическим свойствам близки к ним, например, нефтяная сажа, платиновая чернь, черный бархат в области видимого света имеют α , мало отличающийся от 1.

Внешняя поверхность тел не только поглощает, но и испускает собственное излучение, зависящее от температуры.

В соответствии с законом Кирхгофа *излучательная способность* тел пропорциональна их коэффициентам поглощения. Так как коэффициент поглощения абсолютно черного тела $\alpha_{абс.ч.т.} = 1$, то оно обладает максимальной излучательной способностью.

В пирометрии излучения в качестве величин, характеризующих тепловое излучение тел, применяют энергетическую светимость (излучательность) и энергетическую яркость (лучистость). При этом следует различать полную и спектральную светимость и яркость.

Под *полной энергетической светимостью* понимают полную (интегральную) *поверхностную плотность излучаемой мощности*.

Энергетической яркостью тела в данном направлении называется *мощность излучения в единичный телесный угол с единицы площади проекции поверхности тела на плоскость, перпендикулярную данному направлению*. Энергетическая яркость является основной величиной, непосредственно воспринимаемой человеческим глазом, а также всеми пирометрами, основанными на измерении температуры по тепловому излучению.

Все реальные тела по степени поглощения ими лучистой энергии отличаются от черного тела и имеют коэффициент поглощения меньше единицы. Излучательная способность реальных тел также отличается от

лучеиспускательной способности черного тела и может быть охарактеризована коэффициентом излучения полным ε и спектральным ε_λ .

Реальные тела при одинаковой температуре имеют различную излучательную способность, оценку которой производят по отношению к излучательной способности абсолютно черного тела (значок * относится к абсолютно черному телу)

$$\varepsilon_\lambda = \frac{E_\lambda}{E_\lambda^*} = \frac{B_\lambda}{B_\lambda^*}, \quad \varepsilon = \frac{E}{E^*}, \quad (1.30)$$

где ε_λ – коэффициент спектрального излучения (степень черноты монохроматического излучения);

ε – коэффициент полного излучения (степень черноты полного излучения);

E_λ, E_λ^* – спектральная энергетическая светимость;

B_λ, B_λ^* – спектральная энергетическая яркость (воспринимается глазом);

E, E^* – полная энергетическая светимость.

ε_λ является функцией длины волны λ и температуры T . Тело, у которого ε_λ не зависит от температуры и λ , называют серым.

Зависимость между спектральной энергетической светимостью абсолютно черного тела E_λ^* , его температурой T и длиной волны λ устанавливается *законом Планка* (рисунок 1.17)

$$E_\lambda^* = c_1 \cdot \lambda^{-5} \cdot (e^{\frac{c_2}{\lambda T}} - 1)^{-1}, \quad (1.31)$$

где c_1, c_2 – константы.

Для выбранной λ с увеличением температуры резко возрастает E_λ^* или B_λ^* , так как

$$B_\lambda^* = k_\lambda \cdot E_\lambda^*. \quad (1.32)$$

Указанный факт устанавливает возможность измерения температуры тела по его спектральной яркости с высокой чувствительностью.

Из графика (рисунок 1.18) видно, что λ_{\max} уменьшается с увеличением температуры. По мере уменьшения температуры черного тела максимум распределения энергии его излучения смещается в сторону длинноволновой области спектра.

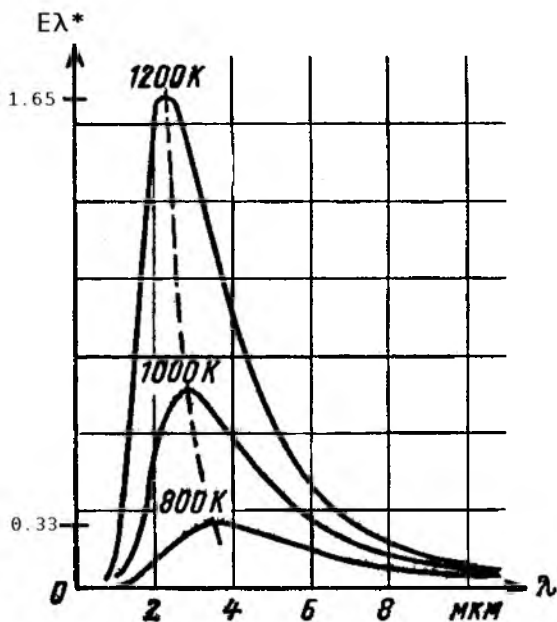


Рисунок 1.18 – Семейство кривых E_{λ}^* , построенных по закону Планка

Это и явилось основанием использовать для измерения яркостной температуры тел инфракрасную область спектра.

Для реальных тел, имеющих каждый свой ϵ_{λ} :

$$V_{\lambda} = \epsilon_{\lambda} \cdot V_{\lambda}^* . \quad (1.33)$$

Если *реальные тела имеют одну и ту же температуру*, то из-за разности ϵ_{λ} измеренные значения V_{λ} будут различаться, что не позволяет иметь единую шкалу прибора, отградуированную в значениях истинной температуры различных объектов. В связи с этим шкалу пирометра приходится градуировать по излучению абсолютно черного тела.

Так как излучательная способность реальных тел меньше, чем черных, то показания пирометра будут соответствовать не действительной температуре реального тела, а дают условную температуру, в данном случае, так называемую яркостную температуру.

Яркостной температурой реального тела называют такую температуру абсолютно черного тела, при которой его спектральная яркость $V_{(\lambda, T_2)}^*$ равна спектральной яркости реального тела $V_{(\lambda, T)}$ при его действительной температуре T .

Используя (1.31), (1.32), (1.33), получим:

$$\frac{1}{T_y} - \frac{1}{T} = \frac{\lambda}{c_2} \cdot \ln \frac{1}{\varepsilon_\lambda} \quad (1.34)$$

Видно, что яркостная температура всегда меньше действительной температуры, так как $\varepsilon_\lambda < 1$.

Приборы, предназначенные для измерения яркостной температуры в видимой части спектра, обычно называют *оптическими и фотоэлектрическими пирометрами*.

Как видно из рисунка 1.18, с повышением температуры максимум кривой распределения энергии излучения по спектру смещается в сторону коротких волн. Длина волны λ_{\max} , соответствующая максимуму кривой распределения энергии в спектре излучения черного тела, связана с абсолютной температурой T соотношением:

$$\lambda_{\max} T = b, \quad (1.35)$$

где b – постоянная, равная 2896 мкм · К.

Соотношение (1.35) носит название *закона смещения Вина*. Пунктирная линия (рисунок 1.18), проходящая через максимумы всех кривых, соответствует закону смещения Вина.

В видимой части спектра смещение λ_{\max} и, следовательно, перераспределение энергии, вызываемое изменением температуры тела, приводит к изменению его цвета. Это послужило основанием существующие *методы измерения температур тел*, основанные на изменении с температурой распределения энергии внутри данного участка спектра излучения, назвать *цветовыми методами*. Условная температура тела, измеренная этими методами, называется *цветовой температурой*.

Наибольшее распространение из существующих получил метод измерения цветовой температуры в видимой части спектра по отношению энергетических яркостей в двух спектральных интервалах.

Цветовой температурой (T_c) называется такая температура абсолютно черного тела, при которой отношение его спектральных

энергетических яркостей $\frac{B_{(\lambda_1, T_c)}^*}{B_{(\lambda_2, T_c)}^*}$ при длинах волн λ_1 и λ_2 равно отношению

спектральных яркостей реального тела $\frac{B_{\lambda_1}}{B_{\lambda_2}}$ при тех же длинах волн и его

действительной температуры T .

Известно, что $\frac{B_{\lambda_1}^*}{B_{\lambda_2}^*} = f(T)$. Учитывая (1.31), (1.32), (1.33), получим:

$$\frac{1}{T} - \frac{1}{T_y} = \frac{\ln \frac{\varepsilon_{\lambda_1}}{\varepsilon_{\lambda_2}}}{c_2 \cdot \left(\frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda_2} \right)} \quad (1.36)$$

Для *серых тел*, у которых значение спектрального коэффициента излучения в данном участке спектра не меняется с длиной волны ($\varepsilon_{\lambda_1} = \varepsilon_{\lambda_2}$)

и $\frac{1}{T} - \frac{1}{T_y} = 0$, значит $T = T_y$.

Практически серыми считают реальные тела: керамика, оксиды металлов, огнеупорные материалы, гранит и др. Преимущества цветового метода для них очевидны, так как яркостная температура всегда, в отличие от цветовой, ниже действительной.

Приборы, предназначенные для измерения цветовой температуры по отношению спектральных энергетических яркостей, принято называть *пирометрами спектрального отношения или цветовыми пирометрами*.

1.8 Средства измерения теплового излучения

1.8.1 Оптический пирометр.

Принцип действия основан на сравнении спектральной яркости тела со спектральной яркостью градуированного источника излучения. В качестве чувствительного элемента, определяющего совпадение спектральных яркостей, служит глаз человека (рисунок 1.19).

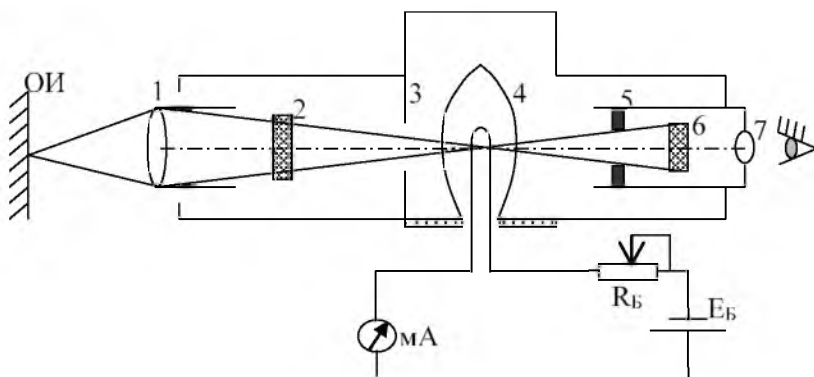


Рисунок 1.19 – Схема оптического пирометра с исчезающей нитью

Обозначения на схеме: 1 – объектив прибора; 2 – поглощающий светофильтр; 3 – диафрагма входная; 4 – оптическая лампа; 5 – выходная диафрагма; 6 – красный светофильтр; 7 – окуляр; ОИ – объект измерения.

Для измерения температуры объектив прибора 1 направляется на ОИ так, чтобы на его фоне видна была в окуляре 7 нить оптической лампы 4.

Сравнение спектральных яркостей ОИ и нити лампы 4 осуществляется при длине волны равной 0,65 мкм, для чего перед окуляром установлен красный светофильтр 6. Диафрагмы 3 и 5 ограничивают входной и выходной углы пирометра, оптимальное значение которых позволяет обеспечить независимость показаний прибора от изменения расстояния между ОИ и объективом.



$T_{я}^{\circ} > T_{я}^H$



$T_{я}^{\circ} = T_{я}^H$



$T_{я}^{\circ} < T_{я}^H$

С помощью реостата R_B изменяют силу тока, идущего от батареи к нити лампы, до тех пор, пока яркость нити не станет равной видимой яркости объекта измерения ($T_{я}^{\circ} = T_{я}^H$). При достижении указанного равенства нить «исчезает» на фоне изображения объекта измерения. В этот момент по миллиамперметру, отградуированному в значениях яркостной температуры нити лампы $T_{я}^H$, определяют яркостную температуру объекта $T_{я}^{\circ}$. Затем по $T_{я}^{\circ}$ и ϵ_{λ} определяют действительную (истинную) температуру объекта T :

$$\frac{1}{T_{я}^{\circ}} - \frac{1}{T} = \frac{\lambda}{c_2} \cdot \ln \frac{1}{\epsilon_{\lambda}}$$

Нить оптической лампы выполнена из вольфрама, поэтому для избежания ее возгонки при температуре выше 1400 °С, для измерения более высоких температур перед лампой включается ослабляющий или поглощающий светофильтр 2. Благодаря этому светофильтру уменьшается видимая яркость ОИ в кратное число раз, что позволяет не перекаливать нить и сохранять стабильность градуировки пирометра.

В оптических пирометрах обычно имеется две шкалы, одной пользуются при невведенном поглощающем светофильтре (800–1200 °С), а второй при введенном поглощающем светофильтре (1200–2000 °С).

Существующие оптические пирометры имеют интервал измерения 800–6000 °С, классы точности 1,5–4,0.

1.8.2 Фотоэлектрический пирометр.

Фотоэлектрические пирометры (ФП) являются автоматическими. Чувствительными элементами, воспринимающими лучистую энергию, служат фотоэлементы, фотоумножители, фотосопротивления и фотодиоды.

По принципу действия ФП бывают двух типов:

а) лучистая энергия, воспринимаемая прибором, попадая на чувствительный элемент, изменяет его параметры (фототок, сопротивление);

б) измерение лучистой энергии осуществляется компенсационным методом, здесь чувствительный элемент работает в режиме нуль-индикатора, сравнивая интенсивности излучения от измеряемого тела и от стабильного источника излучения – миниатюрной лампочки накаливания.

ФП второго типа более сложны, но и более точны, т.к. их показания не зависят от характеристик чувствительного элемента и электронной схемы.

Схема ФП второго типа, работающего по компенсационному методу, представлена на рисунке 1.20.

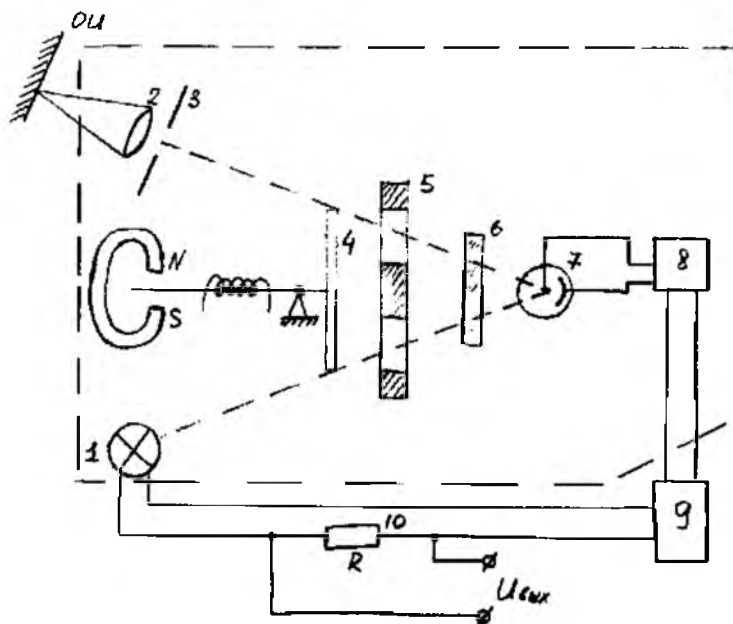


Рисунок 1.20 – Схема фотоэлектрического пирометра

Обозначения на схеме: 1 – регулируемый источник света; 2 – объектив; 3, 5 – диафрагма; 4 – вибрирующая заслонка; 6 – красный светофильтр; 7 – фотоэлемент; 8 – электронный усилитель; 9 – силовой блок; 10 – резистор.

Световые потоки от ОИ и от 1 попадают на фотоэлемент 7 в противофазе. Это осуществляется тем, что перед отверстиями диафрагмы 5 установлена вибрирующая заслонка 4, поочередно перекрывающая эти отверстия. Каждый из световых потоков, попадая на фотоэлемент, создает противоположный по фазе синусоидальный ток. При одинаковых спектральных яркостях от ОИ и от источника 1, воздействующих в противофазе, на фотоэлементе генерируется постоянный ток. Если спектральные яркости не равны друг другу (например, при изменении температуры ОИ), то в цепи фотоэлемента появляется переменная составляющая фототока, которая усиливается усилителем 8 и поступает на фазочувствительный каскад силового блока 9. В результате изменяется ток накала лампы 1 до тех пор, пока на фотоэлементе не уравниются световые потоки от ОИ и от 1. Ток лампы, однозначно связанный с ее спектральной яркостью, может служить мерой яркостной температуры объекта. Потому, измеряя автоматическим потенциометром падение напряжения на резисторе 10, шкалу потенциометра градуируют в значениях яркостной температуры.

ФП имеют основную погрешность $\pm 1\%$ (800–2000°C) и $\pm 1,5\%$ ($>2000^\circ\text{C}$).

1.8.3 Пирометр спектрального отношения (цветовой пирометр).

Эти пирометры предназначены для измерения цветовой температуры путем измерения отношения спектральных энергетических яркостей, соответствующих двум длинам волн.

Существуют двухканальные и одноканальные цветные пирометры (ЦП). В *двухканальных ЦП* измерительные сигналы, соответствующие каждой длине волны излучения, передаются одновременно по двум независимым каналам, из соотношения величин данных сигналов определяется мгновенная цветовая температура T_c объекта. Двухканальные ЦП используются в основном в лабораторных условиях, когда требуется определить T_c с большой скоростью.

В *ЦП с одноканальной схемой* измерения два различных монохроматических потока с помощью оптического коммутатора поочередно подаются на один фотоэлектрический приемник. Одноканальные ЦП обладают большой стабильностью, поэтому имеют широкое применение. Схема одноканального ЦП приведена на рисунке 1.21.

Обозначения на схеме: Т – телескоп; БП – блок преобразования сигналов; 1 – объект измерения; 2 – оптическая система; 3 – obtюратор – диск с двумя отверстиями (в одном красный светофильтр, в другом синий); 4 – фотоэлемент; 5 – предварительный усилитель; 6 – БП (включает в себя: дифференциальные цепочки, пик-детектор, логарифмическое звено с цепочкой RC, амплитудный ограничитель напряжения, фильтр); 7 – синхронный переключатель; 8 – синхронный двигатель; 9 – автоматический потенциометр.

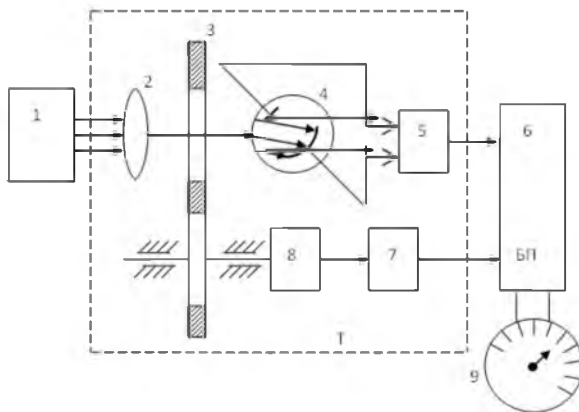


Рисунок 1.21 – Схема одноканального цветового пирометра

При вращении obtюратора синхронным двигателем на фотоэлемент попеременно попадает излучение красной и синей спектральной яркостей, в результате чего в фотоэлементах формируются импульсы фототока, пропорциональные соответствующим спектральным яркостям.

Импульсы фототока усиливаются в предварительном усилителе, в виде импульсов напряжения трапецидальной формы поступают в БП.

Автоматический потенциометр на выходе БП измеряет постоянную составляющую тока: $I_{cp} = A \cdot \ln \frac{B_{\lambda 1}}{B_{\lambda 2}}$, тогда получается, что ЦП измеряет

отношение $\frac{B_{\lambda 1}}{B_{\lambda 2}} \Rightarrow T_{ц} \Rightarrow T$.

ЦП имеет диапазон 1400—2800 °С, класс точности 1,0.

1.9 Контрольные вопросы к главе 1

1. Расскажите об условных температурных шкалах.
2. Что такое реперные точки? Опишите их свойства.
3. Что такое термодинамическая шкала? Опишите ее свойства.
4. Манометрический термометр. Классификация и область применения.
5. Измерение температуры термоэлектрическим преобразователем.
6. Стандартные градуировки ТЭП
7. Как производится поправка на температуру свободных концов ТЭП?
8. Принцип действия устройства компенсации температуры.
9. Назначение удлиняющих термоэлектрических проводов и их характеристики.

10. Назначение и принцип действия милливольтметров.
11. Назначение и принцип действия потенциометров.
12. Назначение и принцип действия уравновешенных и неуравновешенных мостов.
13. Логометры. Назначение и принцип действия.
14. Расскажите об измерении теплового излучения.
15. Определения и формулы яркостной и цветовой температур.
16. Средства измерения яркостной температуры. Схемы и принцип действия.
17. Средства измерения цветовой температуры. Схемы и принцип действия.

Глава 2. Измерение давления

2.1 Общие сведения

Широкое использование давления в научных исследованиях и в различных отраслях промышленности вызывает необходимость применения большого числа средств измерения давления и разности давлений, различных по принципу их действия, устройству, назначению и точности.

Давление – это отношение силы, действующей перпендикулярно поверхности, к площади этой поверхности. Давление – одна из основных величин, определяющих термодинамическое состояние вещества. С задачей измерения давления сталкиваются при измерениях некоторых технологических параметров, например, *расход газа или пара, уровня жидкости и др.*

Различают *виды давления: атмосферное, абсолютное, избыточное, вакуум (разряжение).*

Абсолютное давление необходимо знать в тех случаях, когда влияние атмосферного давления исключить нельзя, как, например, при изучении вопросов состояния рабочих тел, при определении температуры кипения различных жидкостей и в других подобных случаях.

При контроле технологических процессов и при проведении научных исследований в большинстве случаев приходится иметь дело с измерением избыточного и вакуумметрического давлений, а также с измерением разности давлений.

Атмосферное давление – давление, создаваемое массой воздушного столба земной атмосферы. *Абсолютное давление* – давление, отсчитанное от абсолютного нуля. За начало отсчета абсолютного давления принимают давление внутри сосуда, из которого полностью откачан воздух. Под термином абсолютное давление P подразумевается полное давление, под которым находится жидкость, газ или пар. Оно равно сумме давлений избыточного $P_{и}$ и атмосферного $P_{атм}$:

$$P = P_{и} + P_{атм}. \quad (2.1)$$

Избыточное давление – разность между абсолютным давлением, большим атмосферного, и атмосферным давлением:

$$P_{и} = P - P_{атм}. \quad (2.2)$$

Вакуум – разность между атмосферным давлением и абсолютным давлением, меньшим атмосферного:

$$P_{в} = P_{атм} - P. \quad (2.3)$$

а) *по виду измеряемого давления*: манометры избыточного давления; манометры абсолютного давления; барометры; вакуумметры; мановакуумметры (для измерения избыточного давления и вакуума); напорометры (для измерения малых избыточных давлений до 40 кПа); тягомеры (для измерения разрежения газа до 40 кПа); тягонапорометры (для измерения малых давлений и разрежений газа с диапазоном $-20 \div +20$ кПа); дифманометры (для измерения разности давления);

б) *по принципу действия*: жидкостные; поршневые; деформационные; ионизационные; тепловые; электрические.

Такое подразделение СИ давления не является исчерпывающим.

Ниже рассмотрим СИ давления, широко применяемые в качестве *технических* в технологических измерениях.

2.2 Жидкостные СИ давления с гидростатическим уравниванием

В них *мерой измеряемого давления является высота столба рабочей жидкости*.

Рабочая жидкость – дистиллированная вода, ртуть, этиловый спирт или трансформаторное масло. Выбор рабочей жидкости определяется диапазоном измеряемого давления, условиями эксплуатации и требуемой точностью измерения.

В настоящее время номенклатура жидкостных СИ существенно ограничена. Большинство заменены более совершенными деформационными СИ. К числу жидкостных СИ, которые еще применяются на технологических потоках, относятся поплавковые и колокольные дифманометры.

2.2.1 Поплавковые дифманометры.

Принцип действия: уравнивание измеряемого перепада давления гидростатическим давлением, создаваемым столбом рабочей жидкости, заполняющей дифманометр.

Поплавковый дифманометр (рисунок 2.2) представляет собой два сообщающихся сосуда. Площадь сечения F широкого сосуда \geq площади сечения f узкого сосуда 7.

Сосуды заполнены рабочей жидкостью (ртуть или трансформаторное масло) до нулевой отметки 0. Во внутренней полости сосуда 1 находится поплавок 2, связанный со стрелкой 3 отсчетного устройства. При подключении прибора к объекту измерения большее давление подается в сосуд 1, а меньшее – в сосуд 7. Подача давления осуществляется через вентили 5 и 6. Вентиль 4 служит для того, чтобы исключить возможность выброса рабочей жидкости при односторонней подаче давления. С этой целью перед подключением прибора к объекту вентиль 4 открывают, а после стабилизации давления в обоих сосудах, закрывают. При отключении

прибора от объекта необходимо предварительно открыть вентиль 4, а затем закрыть вентили 5 и 6.

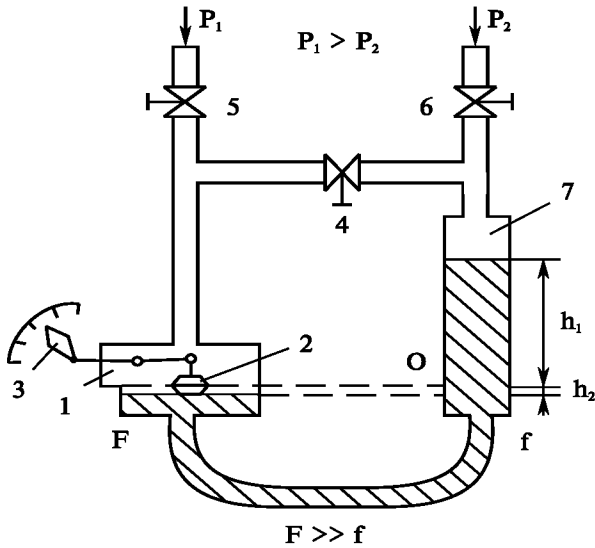


Рисунок 2.2 – Схема поплавкового дифманометра

В процессе измерения, жидкость в широком сосуде перемещается вниз, а вместе с ней перемещается поплавок 2, который через механическую передачу перемещает указатель 3 отсчетного устройства. Перемещение поплавка будет происходить до тех пор, пока измеряемая разность давлений $(P_1 - P_2)$ не уравновесится давлением столба жидкости высотой $h_1 + h_2$, т.е.:

$$P_1 - P_2 = g(\rho_{жк} - \rho_c)(h_1 + h_2), \quad (2.4)$$

где g – местное ускорение свободного падения,
 $\rho_{жк}$ – плотность рабочей жидкости,
 ρ_c – плотность измеряемой среды.

Принимая $V_1=V_2$ (объемы вытесненной жидкости из широкого сосуда и поступившей в узкий сосуд), получим:

$$F \cdot h_2 = f \cdot h_1,$$

отсюда

$$h_2 = \frac{1}{(1 + F/f)(\rho_{жк} - \rho_c)} (P_1 - P_2). \quad (2.5)$$

Это статическая характеристика поплавкового дифманометра, из которой следует: чтобы получить одинаковые перемещение h_2 поплавка при измерении разности давлений в различных диапазонах, необходимо изменять отношение F/f . Практически это достигается заменой узкого сосуда одного диаметра на сосуд другого диаметра.

Поплавковые дифманометры рассчитаны на номинальные перепады давления, верхние пределы которого ограничены значениями от 6,3кПа до 0,1МПа. Класс точности – 1,0 и 1,5.

Достоинства: поплавковый дифманометр обеспечивает высокую точность измерений и возможность регистрации показаний без применения специальных источников энергии.

Недостатки: наличие в качестве рабочей жидкости – ртути, токсичной жидкости, которая при резких изменениях давления может загрязнять объект измерения и окружающую среду.

2.2.2 Колокольные дифманометры.

Колокольные дифманометры (рисунок 2.3) представляют собой колокол, погруженный в рабочую жидкость и перемещающийся под влиянием разности давлений. Противодействующая сила создается за счет утяжеления колокола при его подъеме и уменьшении тяжести колокола при его погружении. Достигается это за счет изменения гидростатической подъемной силы, действующей на колокол согласно закону Архимеда.

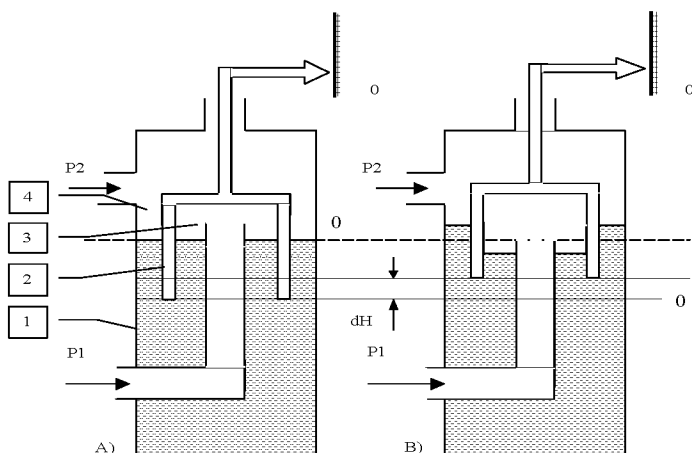


Рисунок 2.3 – Схема колокольного дифманометра

Принцип действия: если давления в измерительных камерах 2 и 3 равны, то колокол 1 находится в положении, показанном на рисунок 2.3А.

Если перепад давления $d(P_1 - P_2)$ существует, то колокол всплывает. Всплытие происходит до тех пор, пока изменение подъемной силы от перепада давления на колокол и изменение гидростатической подъемной силы не уравниваются.

В состоянии равновесия:

$$d(P_1 - P_2) \cdot F = (dH + dY) \cdot f \cdot g \cdot (\rho_{ж} - \rho_c),$$

$$dh = dY + dX,$$

$$d(P_1 - P_2) = dh \cdot (\rho_{ж} - \rho_c) \cdot g,$$

$$F \cdot dY = df \cdot dH + (\Phi - F) \cdot dY,$$

где F – площадь внешнего поперечного сечения колокола,
 dH – перемещение колокола,
 dY – перемещение жидкости под колоколом,
 df – площадь поперечного сечения стенок колокола,
 dh – разность уровней жидкости снаружи и внутри колокола,
 dX – перемещение жидкости внутри сосуда,
 Φ – площадь поперечного сечения широкого сосуда,
 f – внутренняя площадь поперечного сечения колокола,
 $\rho_{ж} \cdot \rho_c$ – плотность рабочей жидкости и измеряемой среды.
 Отсюда

$$dH = \frac{f}{g(\rho_{ж} - \rho_c)} d(P_1 - P_2).$$

После интегрирования от 0 до $(P_1 - P_2)$:

$$H = \frac{f}{g(\rho_{ж} - \rho_c)} (P_1 - P_2). \quad (2.6)$$

Формула (2.6) – статическая характеристика колокольного дифманометра с гидростатическим уравновешиванием.

Для обеспечения измерения перепада давления в широком диапазоне f / df должно быть по возможности уменьшено.

Колокольный дифманометр обладает высокой чувствительностью. Поэтому может быть использован для измерения малых давлений, перепадов давлений и разрежений.

Некоторые модификации колокольных дифманометров снабжаются преобразователями П, посредством которых перемещение колокола преобразуется в унифицированный сигнал, передаваемый по каналу связи.

2.3 Деформационные средства измерения давления

Принцип действия деформационных СИ основан на использовании упругой деформации чувствительного элемента (ЧЭ) или развиваемой им силы.

2.3.1 Чувствительные элементы.

Мерой измеряемого давления в СИ данного типа является деформация упругого ЧЭ или развиваемая им сила.

Различают три основных формы ЧЭ: трубчатые пружины, сиффоны, мембраны.

Трубчатые пружины.

Трубчатая пружина – манометрическая пружина (пружина Бурдона) – это упругая криволинейная металлическая полая трубка, один из концов которой имеет возможность перемещаться, а другой жестко закреплен. Трубчатая пружина в основном используется для преобразования измеряемого давления, поданного во внутреннее пространство пружины, в пропорциональное перемещение ее свободного конца.

Одновитковая трубчатая пружина.

Наиболее распространена одновитковая трубчатая пружина с овальным поперечным сечением (рисунок 2.4а):

$$N = k \cdot P, \quad (2.7)$$

где N – сила,

P – давление,

$k = f(\gamma)$, γ – центральный угол трубки.

Практически увеличение γ достигается путем увеличения витков трубчатой пружины (рисунок 2.5б):

$$\gamma = 360^\circ \cdot n,$$

где n – число витков.

Криволинейные и прямолинейные трубчатые пружины.

Для измерения высоких $P \leq 1000$ кПа используются прямолинейные (рисунок 2.4в) и криволинейные (рисунок 2.4г) трубчатые пружины.

Перемещение свободного конца происходит не из-за изменения поперечного сечения, а благодаря изгибающему моменту.

Основной недостаток прямолинейной трубчатой пружины – малый угол поворота, что требует применения передаточных механизмов.

Этого недостатка лишена криволинейная трубчатая пружина овального или звездчатого сечения. Угол поворота витой трубчатой пружины равен 40-60°. Поэтому стрелка может быть укреплена непосредственно на свободном конце пружины без применения передаточного механизма.

Трубчатые пружины для $P \leq 5$ МПа изготавливают из латуни, бронзы; для $P \geq 5$ МПа – из легированных сплавов, из стали различных составов; для $P \geq 1000$ МПа – из легированной стали типа 50ХФА.

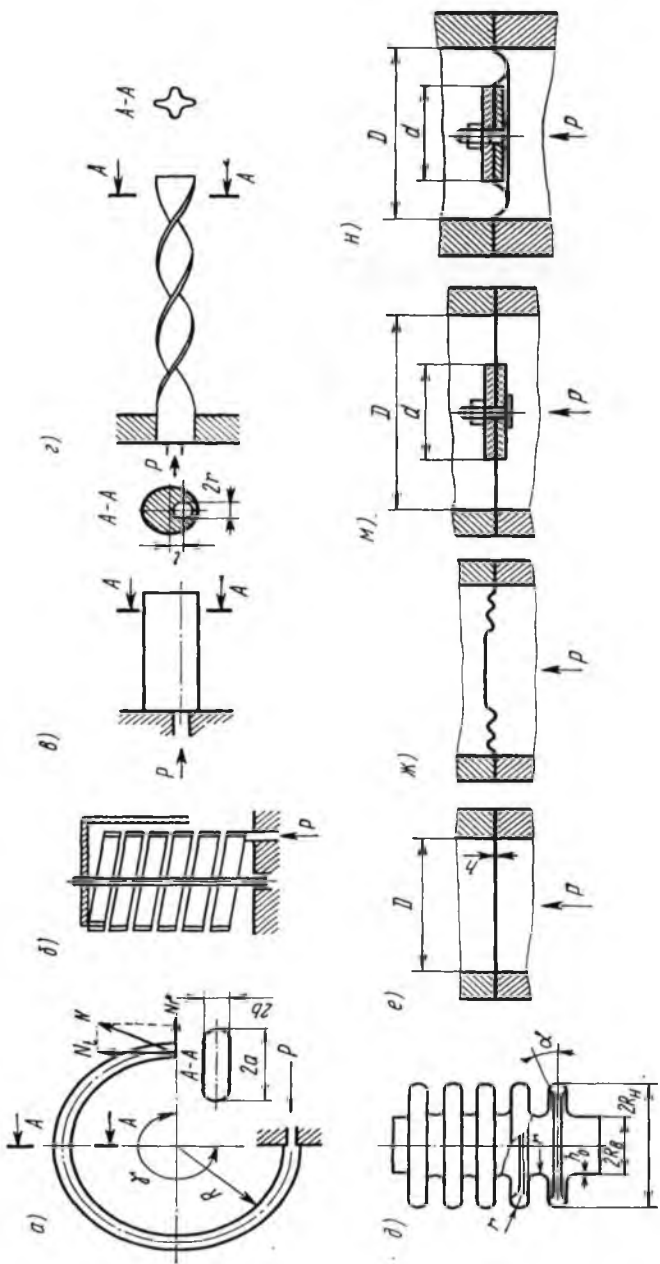


Рисунок 2.4 – Чувствительные элементы деформационных СИ давления

Сильфоны.

Сильфон – тонкостенная цилиндрическая оболочка с поперечными гофрами, способная получать значительные перемещения под действием давления или силы (рисунок 2.4д).

Отношение действующей на сильфон силы к вызванной ею деформации остается постоянным и называется *жесткостью сильфона*. Для увеличения жесткости сильфона часто внутри помещают пружину.

Сильфоны изготавливают чаще всего из бронзы, нержавеющей стали, алюминиевых сплавов.

Диаметр сильфонов = 8-10 мм, 80-100 мм.

Осевое перемещение δ дна сильфона под действием осевой силы N :

$$\delta = k \cdot N, \quad (2.8)$$

где $k = f(R, r, n, \alpha)$;

R – радиус сильфона,

r – радиус закругления гофров,

n – число гофров,

α – угол уплотнения.

$$N = \Delta P \cdot F_{\text{эф}},$$

где ΔP – разность давлений, действующих на сильфон,

$F_{\text{эф}}$ – эффективная площадь сильфона.

Мембраны.

Мембраны бывают: упругие и эластичные (вялые).

Упругие мембраны – гибкая круглая плоская или гофрированная пластина, способная получить прогиб под действием давления.

Статическая характеристика плоских мембран – нелинейная с увеличением давления P . Поэтому в качестве рабочего участка используется небольшая часть возможного хода.

На рисунке 2.4 представлены схематические изображения *плоской* (е) и *гофрированной* (ж) мембран.

Гофрированная мембрана может применяться при больших прогибах, чем плоские, т.к. имеют значительно меньшую нелинейность характеристики.

Мембраны выполнены из различных марок стали, бронзы, латуни.

Глубина гофр оказывает существенное влияние на линейность статической характеристики: чем больше глубина, тем более линейна характеристика.

При измерении атмосферного давления используются гофрированные мембранные коробки, из которых удалён воздух.

Эластичные мембраны предназначены для измерения малых давлений и разности давлений и представляют собой плоские (рисунок 2.4м) или гофрированные (рисунок 2.4н) диски, выполненные из прорезиненной ткани, тефлона и других материалов.

В большинстве случаев используют лишь часть максимально возможного хода мембраны (до 10%). При большом ходе мембраны связь между усилием N и ходом центра мембраны – нелинейная.

Для уменьшения нелинейности используют мембраны с жёстким центром: два металлических диска, закрепленных с двух сторон на мембране.

Для всех ЧЭ не рекомендуется многократное применение, т.к. накапливается остаточная деформация, что приводит к погрешности измерения. Предел измерения ограничивается половиной давления, соответствующего пределу пропорциональности статической характеристики (для рабочих ЧЭ).

Деформационные приборы для измерения давления.

Такие качества этих измерительных приборов (ИП), как высокая точность, простота конструкции, надежность и низкая стоимость, обусловили их применение в промышленности и научных исследованиях.

ИП с одновитковой трубчатой пружиной.

ИП предназначены для измерения избыточного давления и разряжения неагрессивных жидких и газообразных сред.

Приборы выполняются только показывающие (рисунок 2.5).

Для передачи перемещения свободного конца деформационного ЧЭ к указателю манометра используются *секторные* или *рычажные передаточные механизмы*. С помощью этих передаточных механизмов перемещение свободного конца трубчатой пружины в несколько градусов или мм преобразуется в угловое перемещение стрелки на 270 – 300 градусов.

Рычажные передаточные механизмы применяют в тех случаях, когда не требуется высокая точность измерений и прибор подвергается вибрации.

Секторные передаточные механизмы применяются в образцовых приборах и в приборах, где по условию эксплуатации исключена вибрация.

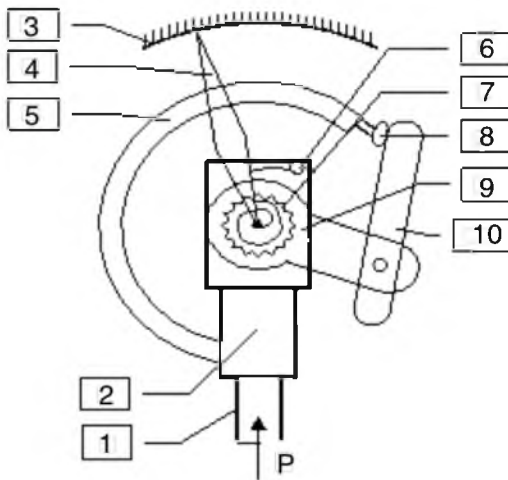


Рисунок 2.5 – ИП с секторным передаточным механизмом

Обозначения на схеме (рисунок 2.5): 1 – держатель; 2 – плата; 3 – шкала; 4 – стрелка; 5 – трубчатая пружина; 6 – спиральная пружина; 7 – зубчатое колесо; 8 – зубчатый сектор; 9 – наконечник; 10 – тяга.

Полость пружины 5 связана с измеряемой средой через канал в держателе 1. Держатель 1 оснащен платой 2, на которой монтируется секторный передаточный механизм. Последний включает в себя зубчатое колесо 7 и зубчатый сектор 8. Для исключения люфта в передаточном механизме используется спиральная пружинка 6. К сектору 8 крепится тяга 10, которая другим концом крепится к наконечнику 9. Посредством тяги перемещение свободного конца пружины передается зубчатому сектору, вращение которого передается стрелке 4 для отсчета показаний по равномерной шкале 3.

Вакуумметры с одновитковой трубчатой пружиной идентичны манометрам, но стрелка может перемещаться как по часовой стрелке, так и против часовой стрелки.

ИП с сифонным чувствительным элементом.

Приборы предназначены для измерения избыточного давления, разрежения и разности давлений. Их выполняют показывающими и самопишущими.

Для измерения разности давлений и расхода жидких и газообразных сред широкое применение получили *сифонные дифманометры* (рисунок 2.6).

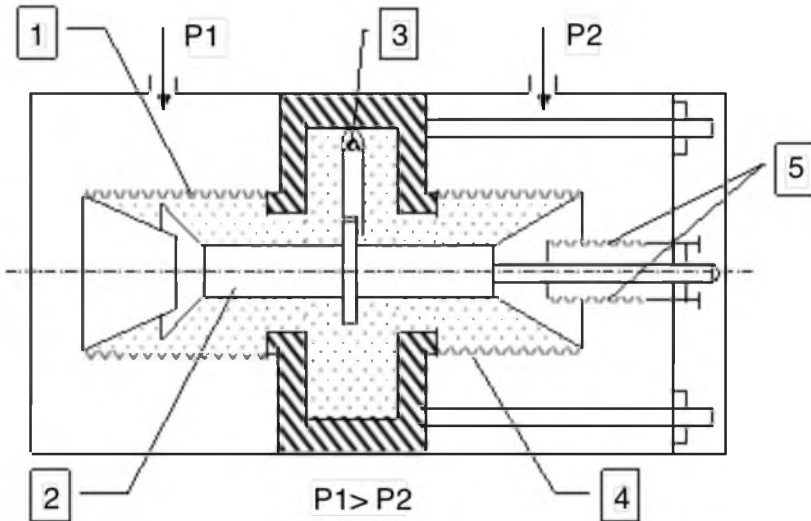


Рисунок 2.6 – Сифонный дифманометр

Обозначения на схеме: 1,4 – рабочие сифоны; 2 – шток; 3 – рычаг; 5 – противодействующие пружины.

Под действием измеряемого перепада давления рабочий сиффон 1 сжимается, что приводит к вытеснению рабочей жидкости, заполняющей внутреннюю полость дифманометра, во внутреннюю полость рабочего сиффона 4. Деформация сиффона вызывает перемещение штока 2 и изменение натяга противодействующих пружин 5. Перемещение штока прекращается, когда усилие деформации сиффонов уравновешивается усилием натяга противодействующих пружин. В процессе перемещения штока 2 последний поворачивает рычаг 3 против часовой стрелки, который соединен с самопишущим механизмом.

Предельные перепады давлений 0,0063-0,25 МПа.

Предельные допустимые измеряемые избыточные давления у этих приборов – 6,3; 16 и 32 МПа.

Класс точности 1,0 и 1,5.

Дифференциально-измерительные преобразователи давления, основанные на методе прямого преобразования.

Для преобразования перемещения чувствительного элемента в сигнал измерительной информации широко применяются индуктивные, дифференциально-трансформаторные, емкостные, тензорезисторные и другие преобразовательные элементы.

Для преобразования усилия, развиваемого чувствительным элементом, в сигнал измерительной информации используются пьезоэлектрические преобразовательные элементы.

На рисунке 2.7 представлена схема дифференциально-трансформаторного (ДТ) измерительного преобразователя давления.

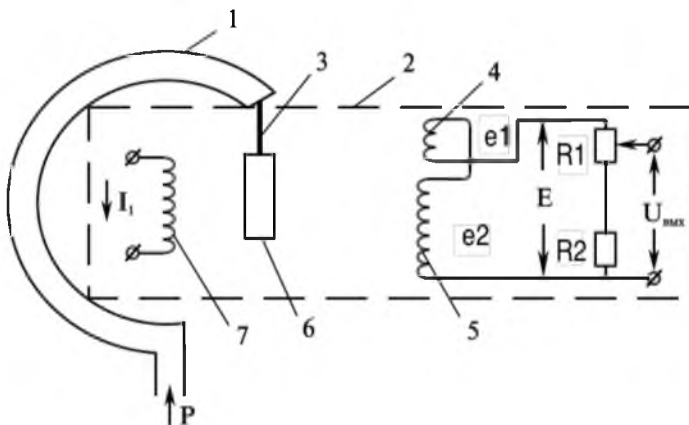


Рисунок 2.7 – Дифференциально-трансформаторный измерительный преобразователь давления

Обозначения на схеме: 1 – деформационный чувствительный элемент, 2 – деформационно-трансформаторный преобразовательный элемент, 3 – тяга, 4,5 – секции вторичной обмотки, 6 – подвижный сердечник, 7 – первичная обмотка.

К выходу вторичной обмотки подключен делитель (R1, R2), который используется при настройке преобразователя на заданный диапазон.

Формирование выходного сигнала: при протекании по первичной обмотке тока I_1 возникают магнитные потоки, пронизывающие обе секции вторичной обмотки и индуцирующие в них ЭДС e_1 и e_2 . Значения этих ЭДС связаны с взаимными индуктивностями M_1 и M_2 :

$$e_1 = 2\pi \cdot f \cdot I_1 \cdot M_1,$$

$$e_2 = 2\pi \cdot f \cdot I_1 \cdot M_2,$$

где f – частота тока I_1 .

При встречном включении обмоток секций 4 и 5:

$$E = e_1 - e_2 = 2\pi \cdot f \cdot I_1 \cdot (M_1 - M_2) = 2\pi \cdot f \cdot I_1 \cdot M,$$

где M – взаимная индуктивность между первичной и вторичной обмотками.

Для унифицированного ДТ-преобразователя, имеющего во вторичной обмотке сопротивление R1 и R2, выходной сигнал $V_{\text{ВЫХ}}$ определяется взаимной индуктивностью $M_{\text{ВЫХ}}$ между первичной обмоткой и выходной цепью:

$$V_{\text{ВЫХ}} = 2 \pi \cdot f \cdot I_1 \cdot M_{\text{ВЫХ}}.$$

$M_{\text{ВЫХ}}$ связано с перемещением δ сердечника δ зависимостью:

$$M_{\text{ВЫХ}} = M_{\text{max}} \frac{\delta}{\delta_{\text{max}}}, \quad (2.9)$$

где M_{max} – максимальное значение взаимной индуктивности между первичной обмоткой и выходной цепью, соответствующее максимальному перемещению сердечника.

Отсюда *статическая характеристика ДТ – преобразователя:*

$$V_{\text{ВЫХ}} = \frac{2\pi f I_1 M_{\text{max}}}{\delta_{\text{max}}} \delta. \quad (2.10)$$

$$\delta_{\text{max}} = 1,6; 2,5; 4 \text{ мм},$$

$$V_{\text{ВЫХ}} = -1 + 1 \text{ В}.$$

$$\delta = k \cdot P, \quad (2.11)$$

где δ – деформация (перемещение) ЧЭ,

k – коэффициент преобразования.

Класс точности ДТ – преобразователя 1,0 – 1,5.

Пьезоэлектрические измерительные преобразователи давления.

Измеряемое давление преобразуется в усилие посредством деформации ЧЭ. Деформация ЧЭ преобразуется в сигнал измерительной информации с помощью пьезоэлектрического элемента.

Принцип действия пьезоэлектрического преобразовательного элемента основан на пьезоэффекте, наблюдаемом у ряда кристаллов: кварц, турмалин, барий и другие.

Пьезо-эффект: если кварцевые пластины X – среза подвергнуть сжатию силой N , то на ее поверхности возникнут заряды разных знаков. Значение заряда Q связано с силой N соотношением:

$$Q = k \cdot N,$$

где k – пьезоэлектрическая постоянная, не зависит от размера пластины и определяется природой кристалла.

Для кварца $k = 2,1 \cdot 10^{-12}$ Кл/Н.

На рисунке 2.8 представлена схема пьезоэлектрического преобразователя давления.

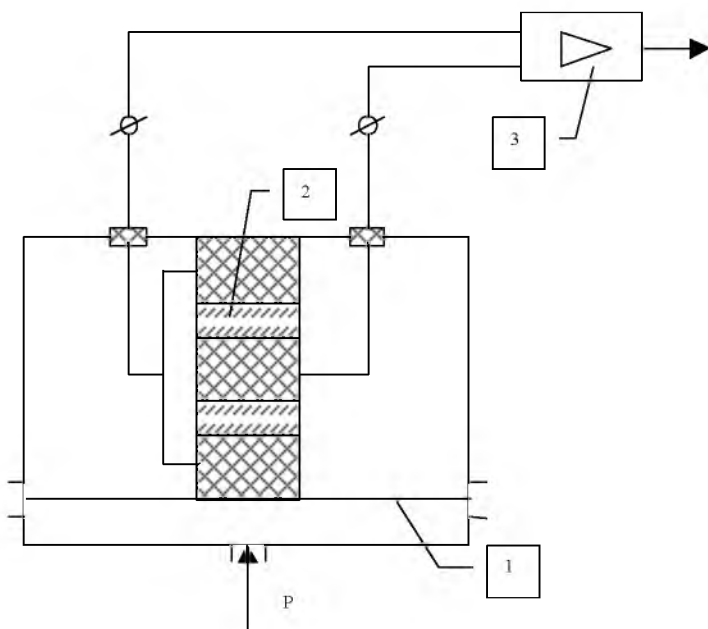


Рисунок 2.8 – Пьезоэлектрический измерительный преобразователь давления

Обозначения на рисунке 2.8: 1 – мембрана, 2 – кварцевая пластина (5мм x 1мм), 3 – электронный усилитель ($R_{вх} = 10^{13}$ Ом).

$$Q = k \cdot f \cdot P, \quad (2.12)$$

где P – измеряемое давление,
 F – эффективная площадь мембраны.

Частота колебаний системы «мембрана – кварцевые пластины» равна десяткам килогерц, поэтому измерительные преобразователи этого типа обладают высокими динамическими характеристиками, что обуславливает их широкое применение при контроле давления в *системах с быстропотекающими процессами*.

Верхние пределы измерений 2,5 – 100 Мпа.

Класс точности 1,5 и 2,0.

2.4 Общие методические указания по измерению давления

Рассмотренные выше СИ избыточного, абсолютного и вакуумного давлений и разности давлений широко применяются при автоматизации технологических процессов, а также при проведении научных исследований.

Точность измерений давлений и разности давлений зависит от выбранного метода измерений, метрологических характеристик средств измерений, от условий измерений и ряда других причин.

Выбор метода и СИ необходимо производить в зависимости от поставленной задачи, требуемой точности и условий измерений.

При выборе СИ необходимо иметь в виду не ту точность, которая свойственна им в нормальных условиях, а ту точность, которую приборы могут обеспечить в данных эксплуатационных условиях.

Одновременно с выбором СИ должен стоять вопрос о диапазоне измеряемых давлений, а, следовательно, о выборе шкалы прибора. При выборе шкалы необходимо иметь в виду, что допускаемые погрешности приборов давления, дифманометров и вторичных приборов выражены в виде приведенных погрешностей, в % от диапазона измерения. Поэтому при прочих равных условиях погрешность измерения для первой половины шкалы прибора будет больше, чем для второй половины его шкалы.

При выборе первичного прибора не следует брать приборы, требующие дополнительного преобразователя для согласования рода энергии выходного сигнала первичного и входного сигнала вторичного измерительных устройств. Применение дополнительного преобразователя в измерительной схеме увеличивает погрешность измерения. При создании АСУ целесообразно применять первичные приборы с унифицированным выходным сигналом постоянного тока.

Внешние условия сильно влияют на точность измерений, поэтому их необходимо учитывать при выборе места установки прибора.

Место установки приборов должно обеспечивать удобство обслуживания и наблюдения за их работой. Длина соединительных линий от места отбора давления до прибора должна быть минимальной. Наибольшая длина соединительных линий не должна превышать 50 м. При этом следует иметь в виду, что с увеличением длины соединительных линий рабочая полоса пропускания частот для данного прибора уменьшается. Для предохранения приборов от непосредственного действия горячей среды, давление которой измеряется, надо устанавливать специальные дополнительные устройства.

2.5 Контрольные вопросы к главе 2

1. Виды давления и единицы его измерения.
2. Классификация СИ давления.
3. Жидкостные средства измерения давления.
4. Принцип действия и схема поплавкового дифманометра.

5. Принцип действия и схема колокольного дифманометра.
6. Деформационные средства измерения давления.
7. Виды чувствительных элементов в деформационных средствах измерения давления.
8. Назначение и принцип действия трубчатых пружин.
9. Назначение и принцип действия сильфонов.
10. Назначение и виды мембран.
11. Принцип действия и схема сильфонного дифманометра.
12. Принцип действия и схема измерительного прибора с одновитковой трубчатой пружиной.
13. Принцип действия и схема пьезоэлектрического измерительного преобразователя давления.
14. Принцип действия и схема дифференциально-трансформаторный измерительного преобразователя давления.
15. Какие общие методические указания по измерению давления?

Глава 3. Измерение количества и расхода жидкости, газа и пара

3.1 Общие сведения

Количество вещества определяют его массой или объемом и измеряют соответственно в единицах массы (кг, т) или в единицах объема (м³, л).

Средства измерения количества вещества за некоторый промежуток времени называют *счетчиками*.

Количество вещества V в единицах объема, прошедшее через счетчик за выбранный промежуток времени $\delta t = \tau_2 - \tau_1$, определяется по разности показаний счетчика N_2 и N_1 , взятых во время τ_2 и τ_1 , т. е.:

$$V = q \cdot (N_2 - N_1), \quad (3.1)$$

где q – постоянная счетчика, определяющая количество вещества, приходящегося на единицу показания счетчика.

Одним из важнейших параметров технологических процессов является *расход* протекающих по трубопроводам веществ.

Расход вещества – это количество вещества, протекающее через данное сечение канала в единицу времени.

Различают:

- *объемный расход* Q , измеряемый в м³/с, м³/ч, л/мин;

- *массовый расход* G , измеряемый в кг/с, кг/ч, т/ч;

- *средний расход*:

$$Q = V / (\tau_2 - \tau_1), \quad (3.2)$$

где V – объем вещества, измеренный счетчиком за время τ ;

- *истинный или мгновенный расход*:

$$Q = dV/dt \text{ или } G = dm/dt$$

есть производная от количества вещества по времени.

3.2 Объемные счетчики

Принцип действия объемных счетчиков основан на непосредственном отмеривании объемов измеряемой среды с помощью мерных камер известного объема и подсчета числа порций, прошедших через счетчик.

Объемные счетчики подразделяются на *опорожняющиеся и вытесняющие*.

Опорожняющиеся объемные счетчики имеют жесткие камеры, из которых измеряемая среда свободно вытекает. Они не пригодны для измерения количества газа.

Простейшим опорожняющимся счетчиком с жесткой камерой является мерный бак или мерник. К этому же виду объемных счетчиков относятся барабанные и опрокидывающиеся счетчики.

Вытесняющие объемные счетчики имеют мерные камеры с перемещающимися стенками, которые вытесняют измеряемую фазу, освобождая камеру для следующей порции.

К объемным счетчикам этого типа относятся однопоршневые; многопоршневые; кольцевые; с овальными шестернями; ротационные; сухие газовые; мокрые газовые; дисковые счетчики.

Объемные счетчики с овальными шестернями.

Для жидких веществ распространены объемные счетчики с овальными шестернями (рисунок 3.1).

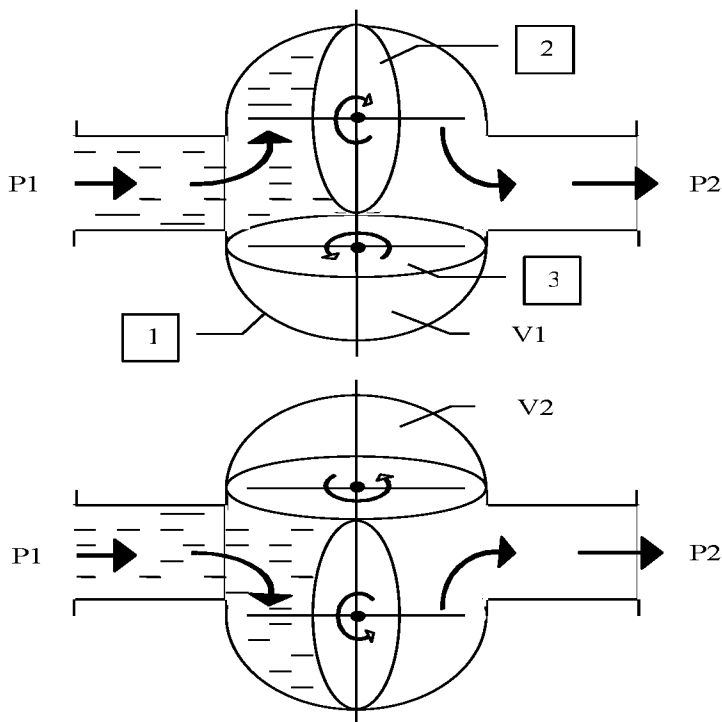


Рисунок 3.1 – Объемные счетчики с овальными шестернями

Обозначения на рисунке 3.1: 1 – корпус; 2,3 – овальные шестерни.

Принцип действия. Набегающий на шестерни измеряемый поток создает на них перепад давления P_1 и P_2 . Под действием этого перепада

поток создает на овальной шестерне 3 крутящий момент и заставляет вращаться эту шестерню, которая ведет шестерню 2.

Объем V1 между шестерней 3 и корпусом вначале отсекается и затем при вращении шестерни – вытесняется. Таким образом, за один оборот шестерни измерительные полости V1 и V2 дважды наполняются и дважды опорожняются. В итоге за один оборот через счетчик проходит объем жидкости, равный четырем объемам V1. Ось одной из шестерен вращает счетный механизм, расположенный вне корпуса прибора.

Достоинства. Точность измерения высокая: (0,5 – 1,0) % от измеряемого значения, потери давления незначительны, показания независимы от вязкости.

Объемные счетчики с овальными шестернями используются для измерения различных жидкостей, в том числе нефти и нефтепродуктов.

Недостаток: необходима хорошая фильтрация измеряемой среды от механических примесей.

Предел измерения: 0,01 – 250 м³/ч.

Калибр: D = 12 – 250 мм.

3.3 Скоростные счетчики

В отличие от объемных счетчиков скоростные счетчики не имеют измерительных камер и производят косвенное измерение количества вещества в объемных единицах.

Чувствительным элементом скоростных счетчиков является аксиальная или тангенциальная турбинки, приводимые в движение потоком жидкости, протекающей через счетчик.

Принцип действия: число оборотов турбинки в единицу времени (n) пропорционально скорости потока, омывающего турбинку:

$$n = k \cdot w ,$$

где k – коэффициент пропорциональности,

w – скорость потока.

Объемный расход через счетчик:

$$Q = w \cdot F , \quad (3.3)$$

где F – сечение счетчика.

Отсюда

$$n = \frac{k}{F} Q , \quad (3.4)$$

поэтому шкала тахометра может быть проградуирована в единицах объемного расхода измеряемой жидкости Q .

Счетчики с аксиальной турбинкой предназначены для измерения количества вещества при расходах до $1300\text{ м}^3/\text{час}$.

Класс точности: 1; 1,5; 2.

Счетчики с тангенсальной турбинкой используются для измерения количества вещества при малых расходах.

Верхний предел измерения: $3\text{--}20\text{ м}^3/\text{час}$.

Класс точности: 2; 3.

Недостаток этих счетчиков – зависимость показаний от вязкости измеряемой жидкости.

3.4 Расходомеры переменного перепада давления

Одним из самых распространенных принципов измерения расхода жидкостей, газов и паров является *принцип измерения переменного перепада давления на сужающем устройстве*.

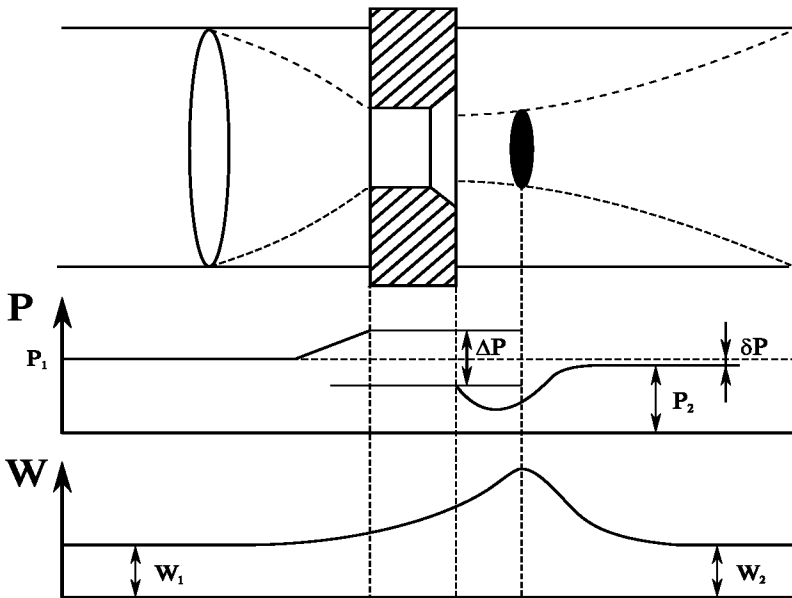


Рисунок 3.2 – Принцип переменного перепада давления на СУ

В соответствии с рассматриваемым принципом в трубопровод устанавливают *сужающее устройство (СУ)*. Пройдя сечение А – А (рисунок 3.2), поток сжимается и, благодаря инерции, сжатие продолжается и

на выходе из СУ, достигает наибольшее значение на некотором расстоянии после нее. Уменьшение струи приводит к увеличению скорости потока W по сравнению с его скоростью до сужения. Это значит, что увеличивается кинетическая энергия потока. Согласно закону сохранения энергии, увеличение кинетической энергии происходит за счет уменьшения потенциальной энергии. А это приведет к тому, что давление потока P на выходе из СУ уменьшится. На СУ создается перепад давления $\Delta P = P_1 - P_2$, измеряемый дифманометром.

К стандартным сужающим устройствам относятся (рисунок 3.3):

- стандартная диафрагма (а);
- стандартное сопло (б);
- сопло Вентури (в);
- трубы Вентури (г).

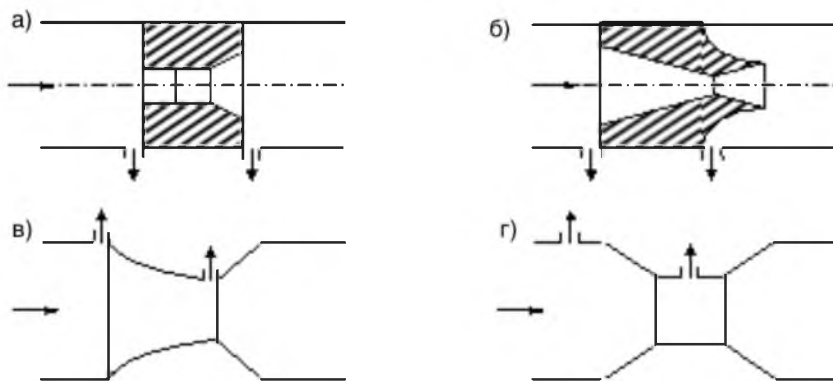


Рисунок 3.3 – Стандартные сужающие устройства

Простота и малая стоимость обуславливают широкое использование дифрагм. Но необходимо при выборе СУ учитывать и следующие факторы:

- 1) если лимитируется потеря давления (δp) на СУ, то при выборе СУ необходимо принимать во внимание эту потерю, определяемую по графику;
- 2) потеря давления при использовании диафрагм и сопла практически одинакова;
- 3) у сопла Вентури δp значительно меньше;
- 4) коэффициент расхода α может изменяться, т.к. отрицательные влияния оказывают местные сопротивления в трубопроводе;
- 5) отношение $\delta p/p$ влияет на погрешность определения поправочного множителя на расширение ε .

Из перечисленных выше требований к выбору СУ следует, что при измерении расхода газа и пара вопрос выбора оптимального модуля СУ

должен решаться путем компромиссного удовлетворения противоречивых требований.

Модуль сужающего устройства:

$$m = \frac{F_o}{F_1} = \frac{d^2}{D^2}, \quad (3.5)$$

где F_o, d – площадь и диаметр входного отверстия СУ,
 F_1 – площадь поперечного сечения потока в сечении А-А,
 D – диаметр трубопровода.

Коэффициент расхода:

$$\alpha = f(\text{Re}_D, m), \quad (3.6)$$

где Re_D – число Рейнольдса,
 m – модуль сужающего устройства.

Коэффициент расхода α не может быть пока точно рассчитан теоретическим путем. Значения α для некоторых типов СУ определены экспериментально.

Экспериментально найденные зависимости α от числа Рейнольдса Re приведены на рисунке 3.4 для условий установившегося потока, протекающего в гладких трубах через стандартную диафрагму (а), через сопло и сопло Вентури (б).

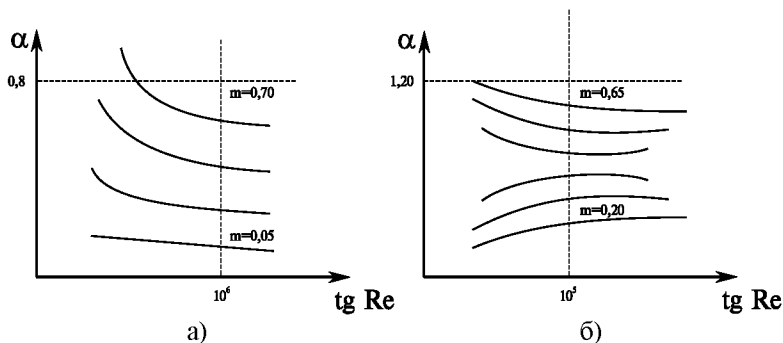


Рисунок 3.4 – Экспериментальные зависимости коэффициента расхода от числа Рейнольдса и модуля СУ

Из графиков видно, что с уменьшением m уменьшается Re . Из этого следует, что при выборе малых m есть гарантия того, что в процессе измерения расхода его уменьшение не приведет к изменению выбранного

значения α . Чем меньше Re , тем зависимость $\alpha = f(Re)$ проявляется сильнее. С увеличением Re уменьшается его влияние на коэффициент расхода.

Значение α приводятся в таблицах нормативных документов.

Указанные СУ не требуют проведения индивидуальных градуировок и называются стандартными СУ.

Стандартные СУ могут быть использованы для диаметров трубопроводов не менее $D=50$ мм, в противном случае увеличивается погрешность определения коэффициента расхода.

3.5 Расходомеры обтекания

Иначе расходомеры обтекания называются *расходомерами постоянного перепада давлений*.

В расходомерах обтекания *обтекаемое тело* (поплавок, поршень, клапан, шарик, поворачивающаяся пластика) воспринимает со стороны набегающего потока силовое воздействие, которое при возрастании расхода увеличивается и перемещает обтекаемое тело. В качестве противодействующей силы служит вес обтекаемого тела при движении потока вертикально снизу вверх или сила противодействия пружины в случае произвольного направления потока.

Выходным сигналом рассматриваемых преобразователей расхода служит перемещение обтекаемого тела.

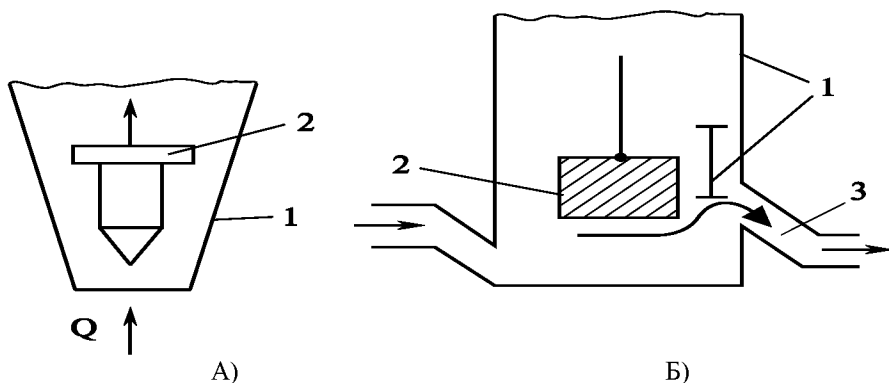


Рисунок 3.5 – Схемы преобразовательных элементов расходомеров обтекания

Обозначения на рисунке 3.5А: 1 – коническая трубка; 2 – поплавок; 3 – верхний обод поплавка. При подъеме вверх поплавок под воздействием возросшего потока увеличивается площадь проходного кольца между поплавком и стенкой конической трубки, что приводит к уменьшению силы, действующей на поплавок.

Обозначения на рисунке 3.5Б: 1 – поршень; 2 – стенка цилиндра; 3 – боковое отверстие. При подъеме поршня увеличивается площадь выходного бокового отверстия в стенке цилиндра 2.

Ротаметры обтекания имеют несколько разновидностей.

Ротаметры со стеклянной конической трубкой предназначены для измерения газов и прозрачных жидкостей. В них используется преобразовательный элемент, показанный на рисунке 3.5(А). Шкала нанесена непосредственно на внешней поверхности стекла. Указателем является верхняя горизонтальная плоскость вращающегося поплавка.

Ротаметры обтекания с цилиндрической стеклянной трубкой и цилиндрическим поплавком. Используются для измерения расхода непрозрачных жидкостей.

Ротаметры с электрическим и пневматическим выходным сигналом для измерения расхода газов и жидкостей на технологических линиях.

Поршневой расходомер постоянного перепада давления. Используется преобразовательный элемент, показанный на рисунке 3.5Б. Класс точности 2,5.

3.6 Электромагнитные расходомеры

Принцип действия таких расходомеров (рисунок 3.6) основан на законе электромагнитной индукции (Закон Фарадея), согласно которому в проводнике, пересекающем магнитные силовые линии, индуцируется ЭДС, пропорциональная скорости движения проводника.

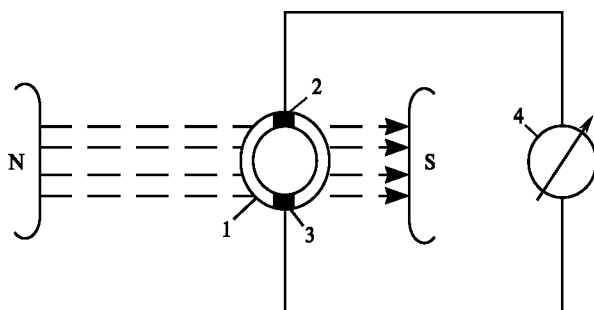


Рисунок 3.6 – Схема электромагнитного расходомера

Обозначения на рисунке 3.6: 1 – металлическая немагнитная труба; 2,3 – электроды; 4 – измерительный прибор.

Если в качестве проводника использовать поток электропроводящей жидкости, текущей между полюсами магнита, и измерить наведенную в жидкости ЭДС, то можно определить скорость потока или объемный расход жидкости. Внутренняя поверхность трубы покрыта электроизоляционным материалом (эмаль, стеклопластик, резина).

Наиболее часто применяют такие электромагнитные расходомеры, у которых измеряется электродвижущая сила (ЭДС), индуцируемая в жидкости, при пересечении ею магнитного поля. Для этого между полюсами магнита или электромагнита устанавливают участок трубопровода, который изготовлен из немагнитного материала и внутри покрыт неэлектропроводной изоляцией, вводятся два электрода в направлении, перпендикулярном как к направлению движения жидкости, так и к направлению силовых линий магнитного поля. Разность потенциалов на электродах определяется следующим образом:

$$E = BDv = \frac{4BQ_0}{\pi D} \quad (3.7)$$

где B – магнитная индукция;

D – расстояние между концами электродов, равное внутреннему диаметру трубопровода;

v – средняя скорость;

Q_0 – объёмный расход жидкости.

Из формулы видно, что измеряемая разность потенциалов E прямо пропорциональна объёмному расходу жидкости Q_0 .

Электромагнитные расходомеры могут быть выполнены как с постоянными, так и с электромагнитными, питаемыми переменным током частотой. Эти электромагнитные расходомеры имеют свои достоинства и недостатки, определяющие области их применения.

3.6.1 Электромагнитные расходомеры с постоянным магнитным полем.

К основным достоинствам постоянного магнитного поля можно отнести:

- относительную простоту устройства магнитной системы;
- возможность измерения расходов, изменяющихся с высокой частотой;
- отсутствие многочисленных помех, возникающих при применении переменного магнитного поля;
- возможность измерения расхода веществ с низкой электрической проводимостью.

Постоянному магнитному полю свойственен существенный недостаток – поляризация электродов, при которой изменяется сопротивление преобразователя, а, следовательно, появляются существенные дополнительные погрешности, что нарушает нормальную работу расходомера. Поляризацию уменьшают, применяя электроды из специальных материалов (угольные, каломелиевые) или специальные покрытия для электродов (платиновые, танталовые).

Также электромагнитные расходомеры с постоянным магнитным полем применяют в лабораториях и исследовательской практике при кратковременных измерениях, когда явление поляризации практически не

заметно, и при измерении быстропеременных расходов, измерение которых при переменном магнитном поле невозможно.

Переменное магнитное поле сводит до минимума поляризацию электродов, благодаря чему широко применяется в расходомерах.

Однако применение такого поля имеет ряд ограничений:

1) ограничение возможности применения переменного магнитного поля с малой электрической проводимостью: менее 10^{-6} См/м (например, лёгких нефтепродуктов, спиртов и т. п.);

2) длина проводов, связывающих преобразователь расхода с измерительным прибором, ограничена емкостным сопротивлением между ними и тем больше, чем меньше удельная проводимость жидкости;

3) при переменном магнитном поле наряду с полезным сигналом ЭДС возникает паразитная (трансформаторная) ЭДС. Трансформаторная ЭДС может быть значительно больше полезного сигнала, но обычно составляет 20-30%;

4) переменное магнитное поле вызывает появление вихревых токов Фуко как в магнитопроводе, так и в стенках трубопровода и измеряемой жидкости;

5) возможны помехи из-за блуждающих токов и внешних электромагнитных полей.

3.6.2 Электромагнитные расходомеры с импульсным магнитным полем низкой частоты.

Применение переменного магнитного поля связано со значительными помехами и ограничениями, которые проявляются сильнее с увеличением частоты поля. Поэтому, если не требуется измерение быстропеременных расходов, часто снижают обычную частоту (50 Гц) магнитного поля. Это даёт ряд преимуществ:

1) полностью исчезает влияние внешних помех промышленной частоты;

2) почти полностью устраняется влияние вихревых токов, благодаря чему существенно упрощается создание преобразователей расхода на высокое давление;

3) снижается влияние собственных индукционных и емкостных помех;

4) снижается потребление электроэнергии;

5) возможен отказ от шихтованного магнитопровода;

6) упрощается изготовление благодаря исключению экранировки электродов и измерительных цепей.

Основными достоинствами расходомеры с импульсным магнитным полем являются: более высокая точность измерения по сравнению с переменным полем синусоидальной формы промышленной частоты (относительная погрешность (0,2-0,5) %); значительно меньшая затрачиваемая мощность.

3.6.3 Метрологические характеристики и область применения электромагнитных расходомеров.

Погрешность электромагнитных расходомеров определяется в основном погрешностями их градуировки и погрешностями измерения разности потенциалов ЭДС. Однако электрохимические процессы в потоке жидкости, различные помехи и наводки, непостоянство напряжения питания и другие, на данный момент не позволяют получить той потенциально высокой точности измерений расхода, которая вытекает из принципа действия данного типа расходомеров. При этом, класс точности данного типа расходомеров, как отмечалось ранее, 1,0–2,5.

Тем не менее электромагнитные расходомеры широко применяют в металлургической, биохимической и пищевой промышленности, в строительстве, в медицине, так как они малоинерционные в сравнении с расходомерами других типов. Расходомеры незаменимы в тех процессах автоматического регулирования, где запаздывание играет существенную роль, или при измерении быстро меняющихся расходов.

Гидравлические потери на приборе минимальны, потому что первичные преобразователи электромагнитных расходомеров не имеют частей, выступающих внутрь трубопровода, сужений или изменений профиля.

На показания электромагнитных расходомеров не влияют взвешенные в жидкости частицы и пузырьки газа, а также физико-химические свойства измеряемой жидкости (вязкость, плотность, температура и т. п.), если они не изменяют её электропроводность.

Электромагнитные расходомеры можно монтировать в любом положении на расстояниях, равных не менее 20 диаметров трубопровода после местных сопротивлений и не менее восьми диаметров до местных сопротивлений. Также конструкция первичных преобразователей позволяет применять новейшие изоляционные, антикоррозийные и другие покрытия, что даёт возможность измерять расход агрессивных и абразивных сред.

Отмеченные преимущества обеспечили достаточно широкое распространение электромагнитных расходомеров, несмотря на их относительную конструктивную сложность и необходимость тщательного каждодневного технического ухода (подрегулировка нуля, поднастройка и т.п.).

Электромагнитные расходомеры применяют для измерения очень малых ($3 \cdot 10^{-9}$ м³/с) расходов (например, для измерения расхода крови по кровеносным сосудам) и больших расходов жидкостей (3 м³/с). Причём диапазон измерения расходомера одного типоразмера достигает значения 10:1, т. е. достаточно велик.

Вывод. Основные достоинства электромагнитных расходомеров:

- независимость показаний от вязкости и плотности измеряемого вещества;
- возможность реализации метода для очень больших диаметров трубопроводов и отсутствие при этом дополнительного динамического сопротивления;

- линейность шкалы;
 - необходимость в меньших длинах прямых участков труб, чем у других расходомеров;
 - высокое быстродействие;
 - возможность измерения агрессивных, абразивных и вязких жидкостей;
 - работоспособность при высоких давлениях среды – вплоть до 100 МПа.
- К недостаткам следует отнести:
- невозможность использования расходомеров для непроводящих жидкостей (углеводороды, аммиак, кислоты и др.);
 - наличие дополнительной погрешности от величины электропроводности жидкости;
 - возможность отложения магнетита на стенках измерительного трубопровода расходомера и значительное увеличение погрешности при наличии окислов железа в воде.

3.7 Ультразвуковые расходомеры

Ультразвуковой расходомер — это стандартный расходомер, основой работы которого является измерение скорости потока, а определение расхода потока движущейся среды в нем осуществляется с помощью акустических законов. Такие расходомеры могут быть использованы для измерения расхода потока сред, непроводящих электрический ток.

Принцип действия ультразвукового расходомера поясняется рисунком 3.7.

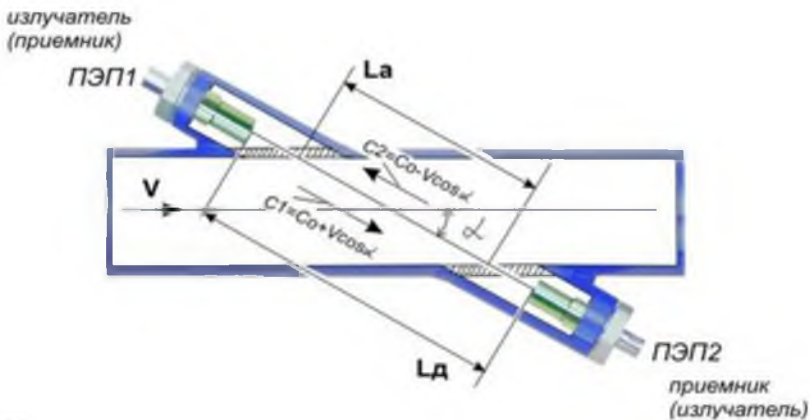


Рисунок 3.7 – Принцип действия ультразвукового расходомера

В большинстве случаев плоскости излучающих и приемных пьезоэлементов расположены под некоторым углом к оси трубы, как показано на рисунке 3.7. Прохождение ультразвука направленного по потоку и против него характеризуется значением скорости прохождения требуемого расстояния и времени, затраченного на его прохождение.

Излучатели и приемники колебаний – главные элементы первичных преобразователей ультразвуковых расходомеров. При сжатии и растяжении в определенных направлениях некоторых кристаллов (пьезоэлементов) на их поверхностях образуются электрические заряды, и наоборот, если к этим поверхностям приложить разность электрических потенциалов, то пьезоэлемент растянется или сожмется в зависимости от того, на какой из поверхностей будет больше напряжение – обратный пьезоэффект. На последнем основана работа излучателей, преобразующих переменное электрическое напряжение в акустические (механические) колебания той же частоты. На прямом пьезоэффекте работают приемники, преобразующие акустические колебания в переменные электрические напряжения.

Структурная схема ультразвукового расходомера показана на рисунке 3.8. Электронный блок ультразвукового расходомера выполнен в влагозащищенном пластмассовом корпусе настенного исполнения. Электронная схема ультразвукового расходомера выполнена по принципу многоступенчатой гальванической развязки ($>1000\text{В}$) всех функциональных элементов между собой. Такой принцип обеспечивает максимальную помехозащищенность и надежность прибора в реальных и жестких условиях эксплуатации. В электронной схеме прибора применены надежные источники питания со временем наработки не менее 500 000 часов.

ПЭП (пьезоэлектрический преобразователь) 1 и 2, работающие попеременно в режиме приемник-излучатель, связаны высокочастотным кабелем РК-50 с ЭБ (электронным блоком) обеспечивающим посылку возбуждающих импульсов на пьезопреобразователь, работающий в режиме излучателя, и прием (усиление и детектирование) слабых сигналов от пьезопреобразователя, работающего в режиме приемника.

При движении жидкости в трубопроводе происходит снос ультразвуковой волны, который приводит к изменению времени распространения ультразвукового сигнала: по потоку жидкости (от ПЭП2 к ПЭП1) – возрастает. Разность времен прохождения УЗС через жидкость по и против потока пропорциональна скорости потока V и, следовательно, объемному расходу Q . По полученным сигналам с пьезопреобразователей рассчитываются: времена прохождения сигнала от ПЭП1 до ПЭП2, расход, накопленный объем жидкости, и значение частоты выходного сигнала, пропорционального расходу. Вычисленные таким образом параметры, пропорциональные расходу, объему и времени подаются на текстовый дисплей для отображения.

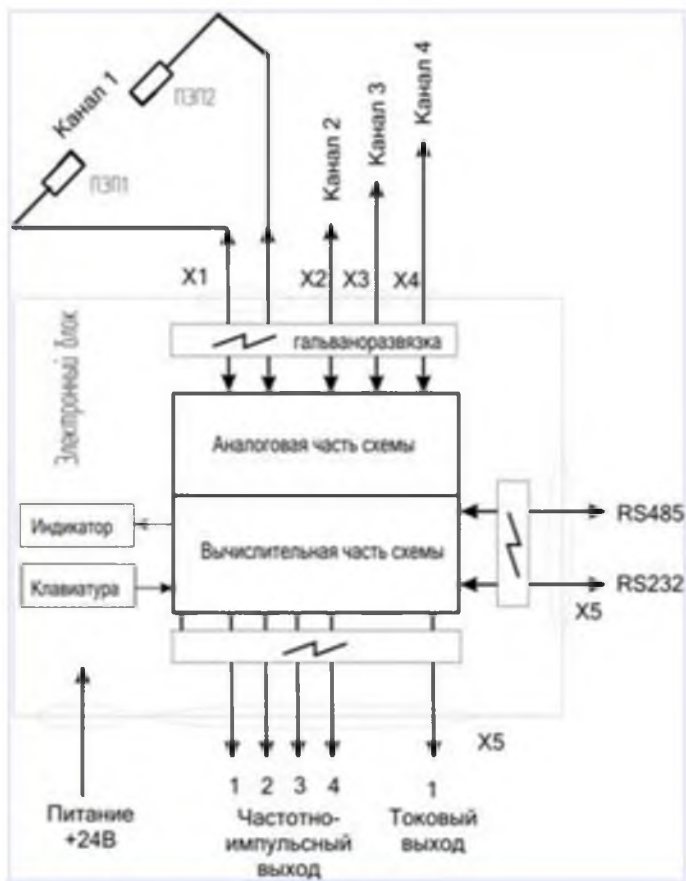


Рисунок 3.8 – Структурная схема ультразвукового расходомера

3.7.1 Виды акустических расходомеров.

По числу акустических каналов ультразвуковые расходомеры подразделяются на однолучевые или одноканальные, двухлучевые или двухканальные и многлучевые или многоканальные. У первых имеются только два пьезоэлемента, каждый из которых по очереди выполняет функции излучения и приема.

Они разделяются на расходомеры, основанные на перемещении акустических колебаний движущейся средой, и расходомеры, основанные на эффекте Доплера, появившиеся позже.

Главное распространение получили расходомеры, основанные на измерении разности времен прохождения акустических колебаний по потоку и против него.

Значительно реже встречаются ультразвуковые расходомеры, в которых акустические колебания направляются перпендикулярно к потоку и измеряется степень отклонения этих колебаний от первоначального направления.

Ультразвуковые расходомеры, основанные на явлении Доплера, предназначены в основном для измерения местной скорости, но они находят также применение и для измерения расхода. Измерительные схемы у них более простые.

Наряду с тремя указанными разновидностями ультразвуковых расходомеров имеются акустические расходомеры, получившие название длинноволновых, работающие в звуковом диапазоне частот акустических колебаний.

Достоинства ультразвуковых расходомеров:

- невысокая стоимость;
- нет движущихся и неподвижных частей в поперечном сечении;
- средний динамический диапазон измерений;
- возможность монтажа на трубопроводы большого диаметра.

Недостатки:

- чувствительность измерений к отражающим и поглощающим ультразвуком осадкам.
- чувствительность к вибрациям.
- чувствительность к перекосам потока для однолучевых расходомеров.

3.8 Тахометрические расходомеры

Тахометрические расходомеры измеряют скорость вращения, количество оборотов крыльчатки или турбины в потоке воды, газа или пара. Принцип действия не меняется в зависимости от того, установлена ли в приборе крыльчатка или турбина; разница только в том, что ось вращения крыльчатки находится перпендикулярно движению потока, а турбины – параллельно потоку жидкости или газа (рисунок 3.9).

Преимущества тахометрических расходомеров:

- невысокая стоимость;
- работают без источника питания;

Недостатки:

- механические препятствия в сечении расходомера;
- малый динамический диапазон;
- неустойчивость измерений;
- невысокая надежность;
- примеси и посторонние предметы в воде влияют на результаты измерений;
- небольшой срок эксплуатации.

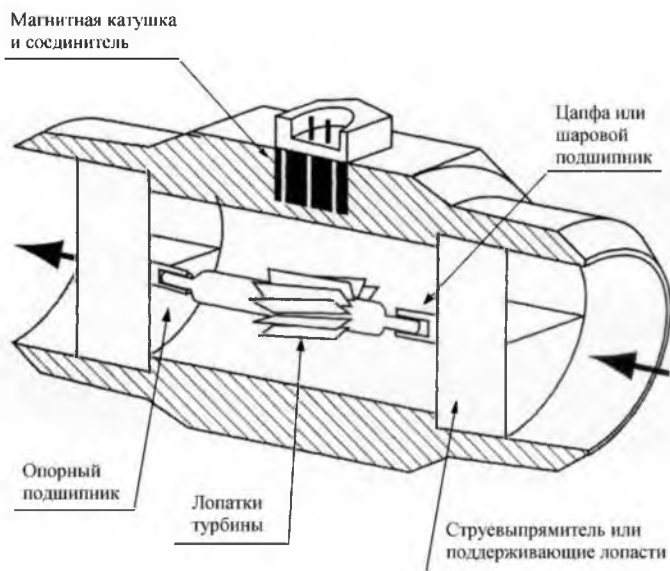


Рисунок 3.9 – Принцип работы тахометрического расходомера

3.9 Тепловые расходомеры

Принцип действия расходомеров основан на нагреве потока вещества и измерении разности температур t до и после нагревателя (*калориметрические расходомеры*) или на измерении температуры t нагретого тела, помещенного в поток (*термоанемометрические расходомеры*). Последние не имеют самостоятельного применения в технологических измерениях.

Массовый расход:

$$G = \frac{N}{kC_p\sigma t}, \quad (3.8)$$

где G – массовый расход,

N – мощность нагревателя,

k – поправочный множитель на неравномерность распределения температуры t по сечению трубопровода,

C_p – теплоемкость вещества при $t = \frac{t_1 + t_2}{2}$.

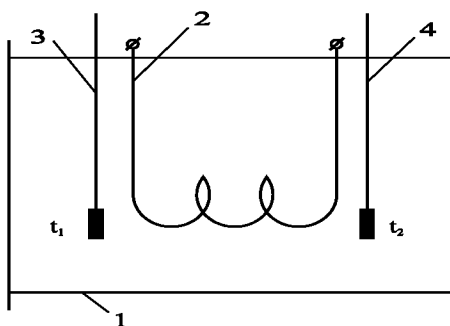


Рисунок 3.10 – Схема теплового расходомера

Обозначения на рисунке 3.10: 1 – трубопровод; 2 – нагреватель потока; 3,4 – термопреобразователи (термопара, термосопротивление).

Измерение расхода G может быть осуществлено 2 способами:

1) по значению мощности N , обеспечивающей постоянную заданную разность температур t^0 ;

2) по значению разности температур t^0 при постоянной мощности N .

По первому способу расход определяют по показаниям ваттметра в цепи нагревателя.

По второму способу, когда к нагревателю подводится постоянная мощность, расход определяют по прибору, измеряющему разность температур t^0 . Недостаток этого способа – гиперболическая характеристика шкалы, а значит падение чувствительности при увеличении расхода.

Калориметрические расходомеры имеют класс точности 0,5-1. Они используются для измерения малых расходов чистых газов без измерения их параметров состояния (давления, t , плотности), что является их достоинством.

3.10 Кориолисовый массовый расходомер

Французский инженер Г. Кориолис первым заметил, что все тела, движущиеся по поверхности Земли, имеют тенденцию к отклонению в сторону, из-за восточного направления вращения планеты. В Северном полушарии отклонение происходит в правую сторону относительно направления движения; в Южном – в левую. Это отклонение непосредственно влияет на океанские приливы, а также на погоду на всей планете.

Первые кориолисовые массовые расходомеры были сконструированы в 1970-х годах. Эти расходомеры искусственно придавали вращающее движение жидкости и измеряли массовый расход, фиксируя результирующий вращающий момент.

В настоящее время всё более используются автоматизированные узлы учёта нефти (УУН) нового поколения, отвечающие мировым тенденциям в

области автоматизации. В соответствии с действующими нормативным документами для товарнокоммерческих расчётов приёмно-сдаточные операции осуществляются в единицах массы. Ранее применяемые расходомеры на коммерческом УУН использовали объёмный принцип измерения расхода, т.е. метод измерения массового расхода является косвенным, что приводит к использованию дополнительных средств измерения, вследствие чего возникают дополнительные погрешности.

При применении объёмно-массового метода измеряют объём (V) и плотность продукта (ρ) при одинаковых условиях, затем определяют массу продукта:

$$M=V \cdot \rho . \quad (3.9)$$

В динамическом режиме учет продукта производится в процессе его подготовки и перекачки, что является перспективным направлением в развитии системы учета.

3.10.1 Конструкция и принцип действия кориолисового массового расходомера.

Принцип действия кориолисового массового расходомера заключается в том, что, когда трубки совершают колебательные движения, в системе возникает дополнительная сила инерции – сила Кориолиса. И под действием этой силы трубки начинают изгибаться. Их изгиб фиксируется датчиками.

Уравнение для определения массового расхода имеет вид:

$$M = S_{kt} \cdot \frac{A_c}{A_e} \cdot \frac{1}{f_V} , \quad (3.10)$$

где M – массовый расход,

A_c – амплитуда колебаний трубок при действии силы Кориолиса,

A_e – амплитуда вынужденных колебаний,

$\frac{A_c}{A_e}$ – фаза,

S_{kt} – постоянная прибора при 20⁰С,

f_V – частота вынужденных колебаний.

Кориолисовый массовый расходомер состоит из следующих частей (рисунок 3.11):

- расходомерная трубка;
- катушка возбуждения и магнит;
- измерительные катушки (электромагнитные детекторы скорости);
- терморезистор;
- технологическое соединение (фланец);
- преобразователь;
- корпус.

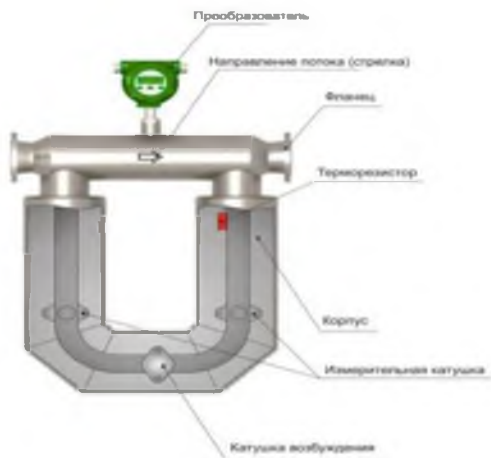


Рисунок 3.11 – Общий вид кориолисового расходомера

При прохождении через сенсор измеряемой массы в результате эффекта Кориолиса электромагнитные детекторы скорости измеряют фазовый сдвиг (рисунок 3.12). Разница во времени между сигналами ΔT измеряется в микросекундах и прямо пропорциональна массовому расходу M :

$$M=f(\Delta T), \quad (3.11)$$

Чем больше ΔT , тем больше массовый расход.

Когда расход отсутствует, синусоидальные сигналы с детекторов находятся в одной фазе (рисунок 3.12).

Детекторы преобразуют этот сигнал в аналоговый или в частотно-импульсный выходной сигнал.

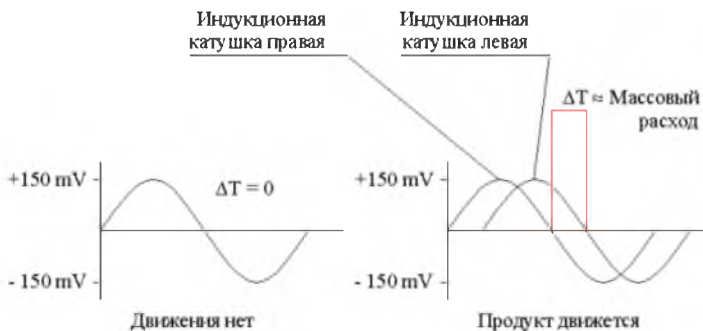


Рисунок 3.12 – Сигналы электромагнитных детекторов

Трубка может быть изогнутой или прямой. Некоторые конструкции могут быть самозаполняющимися, когда установлены вертикально. Когда расходомер состоит из двух параллельных трубок, поток разделяется на два потока на входе и соединяется в один на выходе. При использовании одной трубки (или соединенных последовательно двух трубок) поток в расходомере не разделяется.

В любом случае, привод заставляет трубки вибрировать. Электромагнитный привод состоит из катушки, соединенной с одной трубкой, и из магнита, соединенного с другой трубкой (рисунок 3.13). На катушку подается переменный ток, который заставляет магнит периодически то притягиваться, то отталкиваться.

Кориолисовый расходомер с колеблющимся участком трубопровода, состоит из сенсора и электронного преобразователя сигнала (датчика). Сенсор имеет одну или две измерительные трубки (обычно U-образные), концы которых закреплены неподвижно (рисунок 3.13). Под воздействием электромагнита, расположенного в центре сенсора, и трубка совершает колебания с собственной резонансной частотой (амплитуда около 1мм, частота около 80 циклов в секунду). Благодаря этому жидкость, протекающая по трубке, приобретает вертикальную составляющую движения.

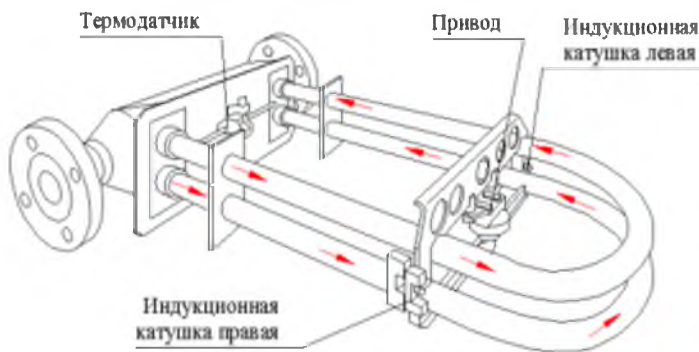


Рисунок 3.13– Строение кориолисового расходомера

Во время первой половины цикла при движении трубки вверх жидкость, протекающая через первую половину трубки, сопротивляется движению вверх и оказывает давление на трубку сверху вниз. Жидкость, движущаяся во второй (выходной) половине трубки, сопротивляется уменьшению вертикальной составляющей движения, оказывая давление на трубку снизу-вверх. Таким образом, в системе возникает дополнительная сила инерции – сила Кориолиса. И под действием этой силы трубки

начинают изгибаться (закручиваться). Их изгиб фиксируется датчиками (детекторами скорости)

Когда направление угловой скорости меняется, эти силы также меняют направление и ветви смещаются в противоположную сторону. Величина этих смещений пропорциональна массовому расходу жидкости через трубу. Смещения регистрируются при помощи электромагнитных детекторов скорости. Их выходной сигнал представляет собой импульс, длительность которого пропорциональна для жидкостей, так и для газов, выдавая измерение расхода с высокой точностью ($\pm 0,1\%$ для жидкостей и $\pm 0,5\%$ для газов).

Кориолисовые расходомеры не чувствительны к изменениям температуры и давления.

3.11 Контрольные вопросы к главе 3

1. Виды и принцип действия объемных счетчиков.
2. Принцип действия, достоинства и недостатки объемных счетчиков.
3. Принцип действия скоростных счетчиков.
4. Принцип переменного перепада давления.
5. Виды сужающих устройств.
6. Расходомеры переменного перепада давления.
7. Расскажите о расходомерах обтекания.
8. Схемы преобразовательных элементов расходомеров обтекания.
9. Принцип действия, достоинства и недостатки электромагнитных расходомеров.
10. Принцип действия, достоинства и недостатки тахометрических расходомеров.
11. Принцип действия, достоинства и недостатки тепловых расходомеров.
12. Принцип действия, достоинства и недостатки кориолисового массового расходомера.
13. Некоторые особенности применения кориолисового расходомера.

Глава 4. Измерение уровня

4.1 Общие сведения

Уровнем называют высоту заполнения технологического аппарата рабочей средой – жидкостью или сыпучим телом.

Уровень измеряют в единицах длины (мм, см, м).

Средства измерения уровня называют *уровнемерами*.

По диапазону измерения различают уровнемеры широкого и узкого диапазонов. Уровнемеры широкого диапазона (0,5-20 м) используются в товароучетных операциях. Уровнемеры узкого диапазона (0-100 мм), (0-450 мм) обычно используются в системах автоматического регулирования (САР).

В настоящее время различают уровнемеры (*по принципу действия*): визуальные СИ уровня, поплавковые, буйковые, гидростатические, электрические, ультразвуковые, радиоизотопные уравнимеры.

К первым относятся мерные линейки, рейки, рулетки с лотами (цилиндрическими стеклами), уровнемерные стекла.

4.2 Поплавковые уровнемеры

Поплавковые уровнемеры – наиболее простые из уровнемеров (рисунок 4.1). Бывают поплавковые уровнемеры узкого и широкого диапазонов.

Уровнемеры узкого диапазона включают в себя шарообразный поплавок диаметром (80-200) мм из нержавеющей стали.

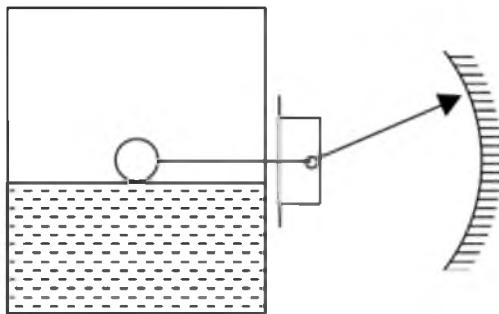


Рисунок 4.1 – Схема поплавкового фланцевого уровнемера

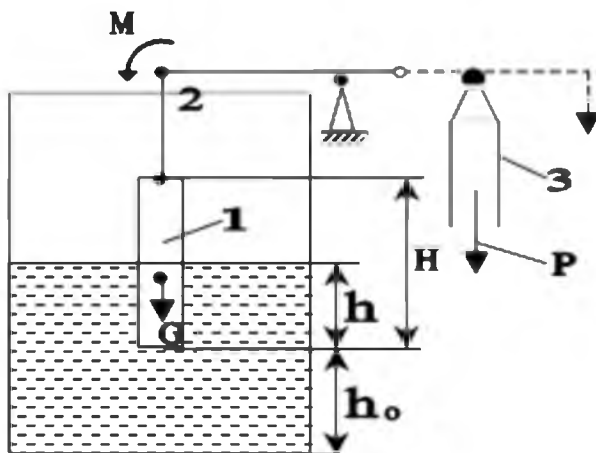
Поплавок плавает на поверхности жидкости и через штангу соединяется со стрелкой измерительного прибора (ИП) или с преобразователем угловых перемещений в унифицированный электрический или пневматический сигнал. Диапазоны измерений: минимальный ± 10 мм, максимальный ± 200 мм.

Класс точности 1,5.

4.3 Буйковые уровнемеры

Буйковые уровнемеры входят в номенклатуру приборов ГСП.

В основу работы буйковых уровнемеров положено физическое явление, описываемое законом Архимеда. Чувствительным элементом в этих уровнемерах является цилиндрический буюк, изготовленный из материала с плотностью \geq плотности жидкости. Буюк находится в вертикальном положении и частично погружен в жидкость. При изменении уровня жидкости в аппарате масса буюка в жидкости изменяется пропорционально изменению уровня. Преобразование веса буюка в сигнал измерительной информации осуществляется с помощью унифицированных преобразователей «сила-давление» и «сила – ток», поэтому различают пневматические и электрические буйковые уровнемеры.



1 – буюк; 2 – рычаг; 3 – сопло;
 h_0 – первоначальный уровень жидкости; М – вращающий момент.

Рисунок 4.2 – Схема буйкового уровнемера

Когда уровень жидкости увеличивается до h , буюк погружается в жидкость, по закону Архимеда вес буюка G уменьшится, значит уменьшится момент M и рычаг 2 начнет поворачиваться вокруг точки O по часовой стрелке. Заслонкой начнет прикрываться отверстие сопла 3, отсюда пневматическая передача:

$$P_{\text{вых}} = k \cdot \Delta G, \quad (4.1)$$

где ΔG – изменение веса буюка,
 k – коэффициент передачи уровнемера.

Уровнемер можно градуировать весовым методом.
Рвых изменяется от 0,02 МПа до 0,1 МПа. Температура рабочей среды равна (-40 ÷ +400)°С. Рабочее давление = 16 Мпа. Класс точности 1,0 – 1,5.

4.4 Гидростатические СИ уровня

Измерение уровня гидростатическими уровнемерами сводится к измерению гидростатического давления P , создаваемого столбом h жидкости постоянной плотности ρ , согласно равенству:

$$P = \rho \cdot g \cdot h. \quad (4.2)$$

Измерение гидростатического давления осуществляется:

- 1) *манометром*, подключаемым на высоте, соответствующей нижнему предельному значению уровня;
- 2) *дифманометром*, подключаемым к резервуару на высоте, соответствующей нижнему предельному значению уровня, и к газовому пространству над жидкостьюю.

4.4.1 Измерения уровня манометром.

Схемы измерения уровня манометром представлены на рисунке 4.3.

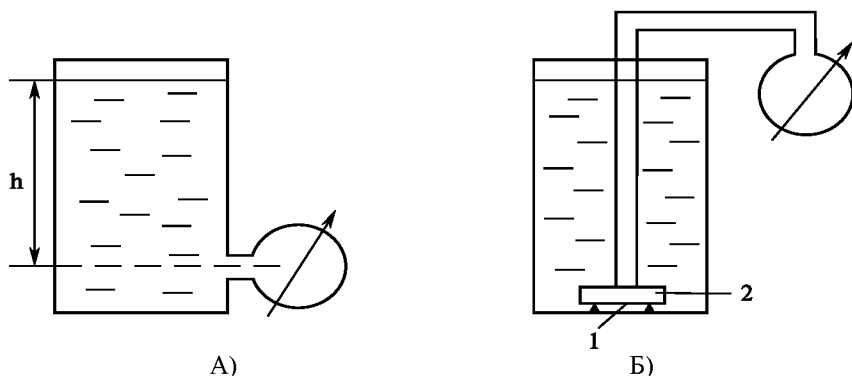


Рисунок 4.3 – Схемы измерения уровня манометром

На рисунке 4.3 А может быть использован манометр любого типа.

На рисунке 4.3 Б используется манометр, измеряющий давление воздуха в колоколе 2, отверстие которого перекрыто тонкой эластичной мембраной 1.

В рассмотренных схемах погрешности измерений определяется классом точности манометров и изменениями плотности жидкости.

Измерение Р манометрами целесообразно в резервуарах, работающих при атмосферном давлении.

Для измерения уровня жидкости в технологических аппаратах, находящихся под давлением, широкое применение получили дифманометры. С их помощью возможно также измерение уровня жидкости в открытых резервуарах, уровнях раздела фаз и уровнях раздела жидкостей.

4.5 Электрические СИ уровня

По виду чувствительного элемента различают:

- емкостные расходомеры;
- кондуктометрические расходомеры.

4.5.1 Емкостные уровнемеры.

Принцип действия основан на зависимости электрической емкости чувствительного элемента (ЧЭ) первичного измерительного преобразователя от уровня жидкости.

Конструктивно ЧЭ выполняются в виде коаксиально расположенных цилиндрических электродов.

Их конструкции зависят от физико-химических свойств жидкости:

1) для неэлектропроводящих жидкостей (диэлектриков), имеющих электропроводность менее 10^{-6} См/м применяются уровнемеры, схема которых показана на рисунке 4.4 А;

2) для измерения уровня электропроводящих жидкостей (удельная электропроводность $> 10^{-4}$ См/м) применяются уровнемеры с другими ЧЭ (рисунок 4.4 Б).

Обозначения на рисунке 4.4 А: 1,2 – коаксиально расположенные электроды (цилиндрические конденсаторы); 3 – изолятор.

Межэлектродное пространство до высоты h заполнено жидкостью, а пространство (Н-h) – парогазовой смесью. Изолятор 3 применяется для фиксации взаимного расположения электродов.

Обозначения на рисунке 4.4 Б: 1 – металлический электрод; 2 – фторопластовая изоляция.

В качестве 2-го электрода используется либо стенка резервуара, если она металлическая, или специальный металлический электрод, если стенка резервуара выполнена из диэлектрика.

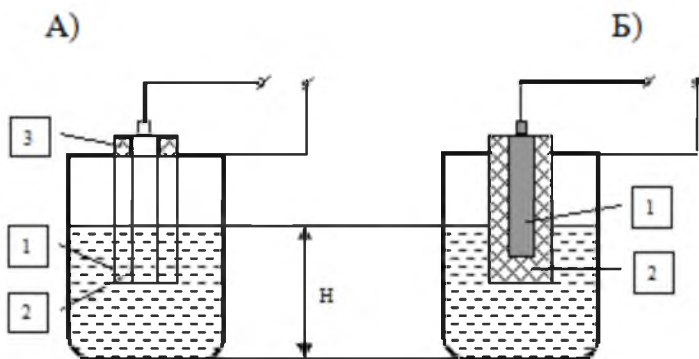


Рисунок 4.4 – Схемы емкостных уровнемеров

Преобразование электрической емкости этих ЧЭ в сигнал измерения информации осуществляется мостовым, резонансным или импульсным методом.

Диапазон измерения емкостных уровнемеров: минимальный $0 \div 0,4$ м, максимальный $0 \div 20$ м. Рабочее давление $2,5 \div 10$ МПа. Класс точности 0,5; 1,0; 2,5.

Существуют *емкостные уровнемеры сыпучих сред*. Верхний предел измерений $4 \div 20$ м. Класс точности 2,5.

4.5.2 Кондуктометрические сигнализаторы уровня.

Предназначены для сигнализации уровня электропроводящих жидких и сыпучих сред с удельной проводимостью $> 10^{-3}$ См/м.

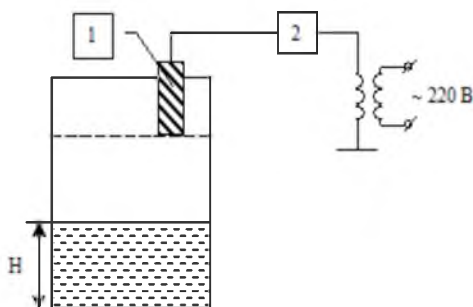


Рисунок 4.5 – Схема сигнализатора верхнего предельного уровня
Обозначения на схеме (рисунок 4.5): 1-электрод; 2-реле.

При достижении уровнем значения h замыкается цепь между 1 и корпусом технологического аппарата. При этом срабатывает реле 2, включая в схему сигнализацию.

Электроды изготавливаются из стали специальных марок или угля, причем угольные электроды используются только при измерении уровня жидких сред.

4.6 Акустические СИ уровня

Существуют различные принципы построения акустических уровнемеров. Наиболее распространен *принцип локации*: измерение уровня по времени прохождения УЗ – колебаниями расстояния от излучателя до границы раздела 2-х сред и обратно.

Уровнемеры, в которых локация границы раздела 2-х сред осуществляется через газ, называются *акустическими*, а уровнемеры с локацией границы раздела двух сред через слой рабочей среды – *ультразвуковыми*.

Преимущество акустических уровнемеров – не зависят от физико-химических свойств и состава рабочей среды. *Недостаток* – зависимость от температуры, давления и состава газа.

Как правило, акустические уровнемеры представляют собой сочетание первичного, промежуточного, а в некоторых случаях и передающего измерительных преобразователей. Поэтому, строго говоря, акустические уровнемеры следует рассматривать как часть измерительной системы с акустическими измерительными преобразователями.

Акустический уровнемер жидких сред состоит из первичного и промежуточного преобразователей. Первичный преобразователь представляет собой пьезоэлемент, выполняющий одновременно функции источника и приемника ультразвуковых колебаний. В промежуточном преобразователе при измерении генератор с определенной частотой вырабатывает электрические импульсы, которые подаются в пьезоэлемент, где они преобразуются в ультразвуковые импульсы. Последние распространяются вдоль акустического тракта, отражаются от границы раздела жидкость – газ и воспринимаются тем же пьезоэлементом, преобразующим их в электрические импульсы. Далее импульсы подаются в промежуточный преобразователь на схему измерения времени отражения сигнала. Расстояние между первичным и промежуточным преобразователями – не более 25 м. Диапазоны измерения уровня 0-1; 0-2; 0-3 м. Класс точности 2,5. Температура контролируемой среды 10-50 °С, давление в технологическом аппарате до 4 МПа.

Акустические уровнемеры сыпучих сред по принципу действия и устройству аналогичны акустическим уровнемерам жидких сред. Акустические уровнемеры сыпучих сред входят в номенклатуру ГСП и имеют унифицированный токовый сигнал. Они могут быть одноточечными и

многоточечными. Многоточечные уровнемеры состоят из нескольких (до 30) первичных измерительных преобразователей акустического типа, каждый из которых размещается на отдельном технологическом аппарате и через коммутатор подключаются к промежуточному измерительному преобразователю. Контролируемая среда – гранулы диаметром $2 \div 200$ мм. Диапазон измерения: минимальный $0 \div 2,5$ м; максимальный $0 \div 30$ м. Класс точности – 1,0; 1,5.

4.7 Контрольные вопросы к главе 4

1. Классификация уровнемеров.
2. Расскажите о поплавковом уровнемере.
3. Схема и принцип действия буйкового уровнемера.
4. Приведите схемы измерения уровня манометром.
5. Принцип действия емкостного уровнемера.
6. Принцип действия кондуктометрического сигнализатора уровня.
7. Принцип действия, достоинства и недостатки акустических уровнемеров.
8. Принцип действия ультразвукового уровнемера.
9. Принцип действия дифманометра.
10. Одноточечные и многоточечные уровнемеры.

Глава 5. Измерения физико-химических свойств жидкостей и газов

К числу *физико-химических свойств*, автоматический контроль которых осуществляется в химико-технологических процессах, относятся: плотность, вязкость, давление насыщенных паров, теплота сгорания.

Измерение плотности жидкости и газов осуществляется для целей управления химико-технологическими процессами и выполнения операций учета количества сырья, топлива, реагентов.

Вязкость определяет качество продукции в химико-технологических процессах, связанных с производством нефтяных масел, консистентных смазок, полимеров, растворителей.

Давление насыщенных паров: для жидких однокомпонентных веществ используется в качестве характеристики их чистоты; для нефтепродуктов – характеризует склонность их к испарению и образованию паровых пробок в топливных системах двигателей.

Теплота сгорания – определяет теплоценность жидких и газообразных топлив, что важно в настоящее время в связи с проводимыми мероприятиями по экономии топливо-энергетическими ресурсом.

5.1 Средства измерения плотности

Плотность вещества ρ – физическая величина, определяемая отношением массы вещества m к занимаемому им объему v :

$$\rho = \frac{m}{v} . \quad (5.1)$$

Плотность жидкостей и газов уменьшается с уменьшением температуры. Плотность газов увеличивается с увеличением давления. Плотность жидкости практически от давления не зависит.

СИ плотности называются *плотномерами* или *денсиметрами* (*денситометрами*) – от латинского *densus* – плотный, густой.

Плотномеры бывают: весовые, поплавковые, гидроаэростатические, гидрогазодинамические, радиоизотопные, акустические, вибрационные и др.

Наиболее часто применяются автоматические плотномеры жидкостей и газов.

5.1.2 Весовые или пикнометрические плотномеры.

Принцип действия – непрерывное взвешивание постоянного объема анализируемого вещества в некоторой емкости или трубопроводе (рисунок 5.1).

Плотность (греч. – *рукнос* – плотный) определяется через удельный вес:

$$\gamma = \rho \cdot g,$$

где ρ – плотность вещества,
 g – ускорение свободного падения.

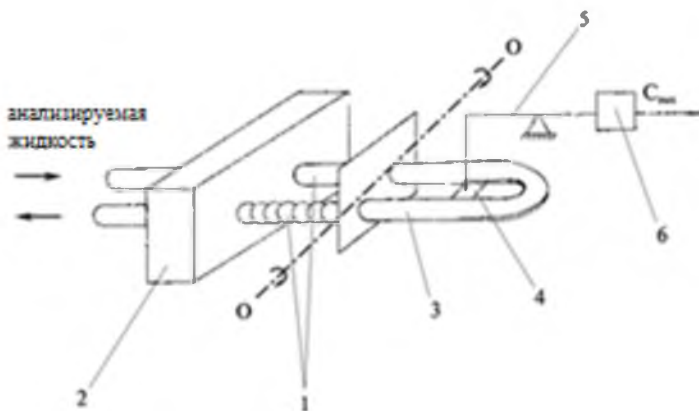


Рисунок 5.1 – Схема весового плотномера

Обозначения на рисунке 5.1:

1 – сильфоны; 2 – неподвижные патрубки; 3 – V-образная трубка;
 4 – тяга; 5 – рычаг; 6 – преобразователь; 7 – противовес.

V-образная трубка из нержавеющей стали через тягу соединена с рычагом (рисунок 5.1). Наличие сильфонов позволяет трубке поворачиваться вокруг оси О-О. При увеличении плотности жидкости увеличивается масса трубки с жидкостью, что через рычаг передается к механоэлектрическому или механоупневматическому преобразователю. Выходной сигнал $C_{пл}$ пропорционален изменению плотности анализируемой жидкости. Противовес 7 служит для уравнивания момента сил, создаваемого трубкой 6 при выбранном нижнем пределе измерения плотности.

Диапазоны измерения: $0,5 \div 2,5 \text{ г/см}^3$. Класс точности: 1=1,5.
 Максимальная рабочая температура $t^{\circ}\text{раб}=100^{\circ}\text{C}$.

5.1.2 Гидро- и аэростатические плотномеры.

Принцип действия – основан на зависимости давления столба анализируемой жидкости или газа P от плотности ρ этих сред:

$$P = \rho \cdot g \cdot h. \quad (5.2)$$

Если принять $h = \text{const}$, тогда $P = k \cdot \rho$ и $\rho = \frac{P}{k}$.

Схема гидростатического плотнмера приведена на рисунке 5.2.

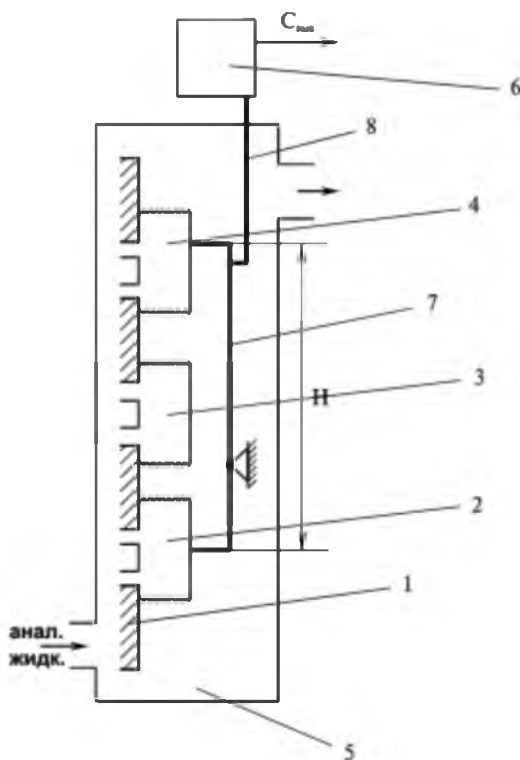


Рисунок 5.2 – Схема гидростатического плотнмера

Обозначения на схеме: 1 – опорная плата; 2,3,4, – сильфоны; 5 – камера; 6 – преобразователь; 7 – измерительный рычаг; 8 – рычаг.

Анализируемая жидкость непрерывно перекачивается через камеру 5, в которой на опорной плате 1 размещены измерительные сильфоны 2 и 4. Расстояние между ними $h = \text{const}$, значит гидростатическое давление, действующее на сильфон 2 больше, чем давление, действующее на сильфон 4. Все сильфоны заполнены вспомогательной жидкостью. Сильфон 3 служит для температурной компенсации и представляет собой жидкостный манометрический термометр. Разность усилий на сильфон 2 и 4, возникающая за счет разности гидростатических давлений на них, создает на измерительном рычаге 7 вращающий момент, который через рычаг 8 передается в преобразователь 6 силы в унифицированный электрический или пневматический сигнал.

Диапазон измерений: $0 \div 0,5 \text{ г/см}^3$; класс точности 1; максимальная температура жидкости 200°C .

5.2 Средства измерения вязкости жидкостей

Вязкость – внутреннее трение – свойство текучих тел (жидкостей и газов) оказывать сопротивление перемещению одной их части относительно другой. Вязкость жидкостей с повышением температуры уменьшается, а газов – увеличивается. Динамическая вязкость до $P = 20$ МПа практически не зависит от давления.

СИ вязкости называется *вискозиметрами*. В настоящее время разработаны автоматические вискозиметры: капиллярные, ротационные, вибрационные, вискозиметры с падающим телом и другие.

5.2.1 Капиллярные вискозиметры (вискозиметры истечения).

Принцип действия механических вискозиметров основан на закономерности истечения жидкости через капилляр, описываемый законом Пуазеля:

$$Q = \frac{\pi d^4}{128 \eta l} (P_1 - P_2), \quad (5.3)$$

где Q – объемный расход жидкости,
 d, l – внутренние диаметр и длина капилляра,
 P_1, P_2 – давление до и после капилляра по потоку,
 η – динамическая вязкость.
При $Q = \text{const}$:

$$P_1 - P_2 = k \cdot \eta, \quad (5.4)$$

где $k = \frac{128 l Q}{\pi d^4}$ – постоянный коэффициент для принятого расхода.

Отсюда для измерения динамической вязкости достаточно при постоянном объемном расходе жидкости измерять перепад давлений на капилляре.

Схема капиллярного вискозиметра, принцип действия которого основан на измерении перепада давлений на капилляре, приведена на рисунке 5.3.

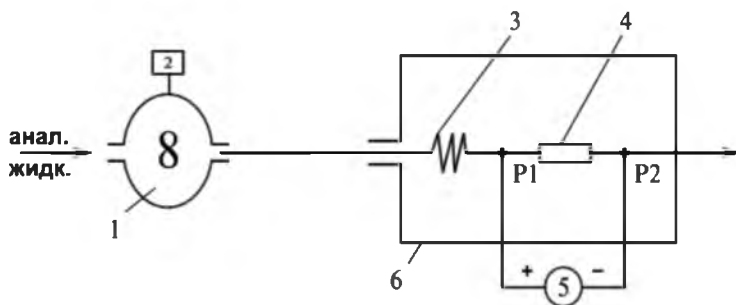


Рисунок 5.3 – Схема капиллярного вискозиметра

Обозначения на схеме: 1– шестеренчатый насос; 2 – синхронный двигатель; 3 – змеевик; 4 – капилляр; 5 – дифманометр; 6 – термостат.

Анализируемая жидкость после насоса поступает в змеевик, где нагревается до температуры масла, заполняющего термостат, а затем – в капилляр, размеры которого выбирают в зависимости от диапазона измеряемых значений вязкости.

Перепад давлений на капилляре измеряется дифманометром с пневматическим или электрическим унифицированным выходным сигналом. t° в термостате = const = 50 или 100 °С.

Диапазон измерений: $(0 \div 2) \cdot 10^{-3}$ Па·с до $(0 \div 1000) \cdot 10^{-3}$ Па·с.

Класс точности: 1,5; 2,5.

5.2.2 Ротационные вискозиметры.

Принцип действия этих механических вискозиметров (рисунок 5.4) основан на измерении крутящего момента, возникающего на оси ротора (цилиндра, диска), погруженного в измерительную среду, при взаимном их перемещении.

Крутящий момент:

$$M = k \cdot \omega \cdot \eta, \quad (5.5)$$

где k – постоянный коэффициент, зависящий от конструкции ротора вискозиметра;

ω – угловая скорость вращения ротора (может быть const);

η – вязкость.

Из большого разнообразия конструкций вращающихся элементов ротационных вискозиметров в автоматических анализаторах используются: цилиндр, шар, диск.

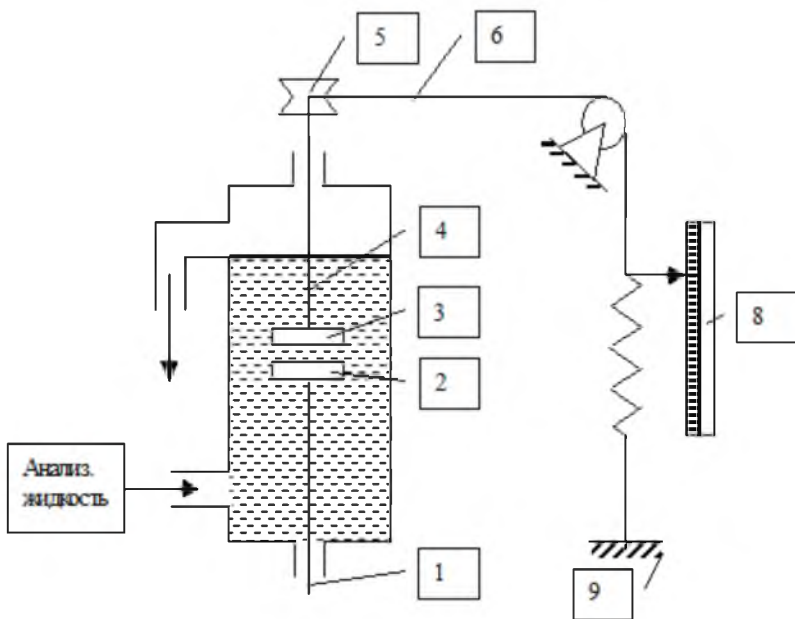


Рисунок 5.4 – Схема ротационного вискозиметра

Обозначения на схеме: 1 – синхронный двигатель; 2,3 – диски; 4 – вал; 5 – шкив; 6 – гибкая нить; 7 – пружина; 8 – шкала; 9 – преобразователь.

Синхронный двигатель 1 вращает диск 2. Момент вращения, создаваемый диском 2, передается через жидкость диску 3. Вращающий момент на диске 3, а следовательно, на шкиве 5, насаженном на одном валу 4 с диском, пропорционален динамичности вязкости. Этот момент уравновешивается силой упругой деформации пружины 7, соединенной с гибкой нитью 6, которая прикреплена к шкиву 5. Значение деформации пружины можно наблюдать по шкале 8. С помощью преобразователя 9 сила упругой деформации пружины 7 преобразуется в унифицированный электрический и пневматический сигнал.

Широкий диапазон измерения 0,01-1000 Па·с.

Класс точности 1-2,5.

5.2 Контрольные вопросы к главе 5

1. Дайте определения следующим понятиям: давление насыщенных паров, вязкость, теплота сгорания, плотность вещества.
2. Классификация плотномеров.
3. Приведите схему весового плотномера и расскажите принцип его действия.

4. Гидростатические плотномеры. Схема и принцип действия.
5. Классификация средств измерения вязкости жидкостей.
6. Схема и принцип действия капиллярного вискозиметра.
7. Схема и принцип действия ротационного вискозиметра.
8. Приведите формулу плотности и опишите ее составляющие.
9. Закон Пузеля и его применение.
10. Как определяется крутящий момент на оси ротора в ротационном вискозиметре.

Глава 6. Измерение концентрации

6.1 Общие сведения

Считают, что *физико-химические свойства анализируемой смеси аддитивны*, т.е. могут быть определены как сумма произведений физико-химических свойств компонентов на их концентрации, выраженные в долях. Обычно используется *аддитивность* по объемным концентрациям.

Если измеряемое физико-химическое свойство аддитивно для смеси, то можно записать:

$$V = k_n \cdot \Pi_{см} = k_n \cdot (\Pi_o \cdot C_o + \Pi_n \cdot C_n), \\ 1 = C_o + C_n,$$

где V – сигнал анализатора, используемого для измерения физико-химического свойства смеси;

k_n – коэффициент преобразования анализатора по физико-химическому свойству;

C_o , C_n – концентрации определяемого и неопределяемого компонентов;

Π_o , Π_n – физико-химические свойства определяемого и неопределяемого компонентов, аналогичные свойству смеси.

Для измерения концентрации компонента в псевдобинарной смеси осуществляется измерение некоторого физико-химического свойства, по которому многокомпонентная смесь может рассматриваться как бинарная.

Для анализа состава бинарных и псевдобинарных смесей жидкостей и газов используются различные анализаторы физико-химических свойств.

Автоматические газоанализаторы используются на ТЭС при сжигании органических топлив для контроля за процессом горения и определения требуемого избытка воздуха.

Приборы газового анализа используются в системах, обеспечивающих безопасное функционирование технологических объектов. Так, например, газоанализаторы, измеряющие концентрацию водорода H_2 в системе охлаждения турбогенераторов, в газах сдувок аппаратов с радиоактивным теплоносителем на АЭС и т.д.

Также в связи с усилением внимания к охране окружающей среды резко расширилось производство и использование газоанализаторов, предназначенных для контроля содержания вредных примесей в газовых выбросах промышленных предприятий и электрических станций, в воздухе производственных помещений и атмосфере.

6.2 Магнитные газоанализаторы

В основу их работы положены различные явления, связанные с взаимодействием определяемого компонента анализируемой смеси с магнитным полем.

Газы, которые втягиваются в магнитное поле, называют *парамагнитными*, а которые выталкиваются – *диамагнитными*.

Количественно магнитные свойства газов определяются величиной, называемой *магнитной восприимчивостью*. Магнитная восприимчивость парамагнитных газов является положительной величиной, диамагнитных газов – отрицательной. Магнитная восприимчивость обладает свойством аддитивности.

Парамагнитными свойствами обладают кислород и окись азота, причем по абсолютному значению их магнитная восприимчивость в 100 раз и более превосходит магнитную восприимчивость остальных газов и паров. На этом основано измерение концентрации кислорода в многокомпонентной смеси.

Схема термомагнитного газоанализатора приведена на рисунке 6.1.

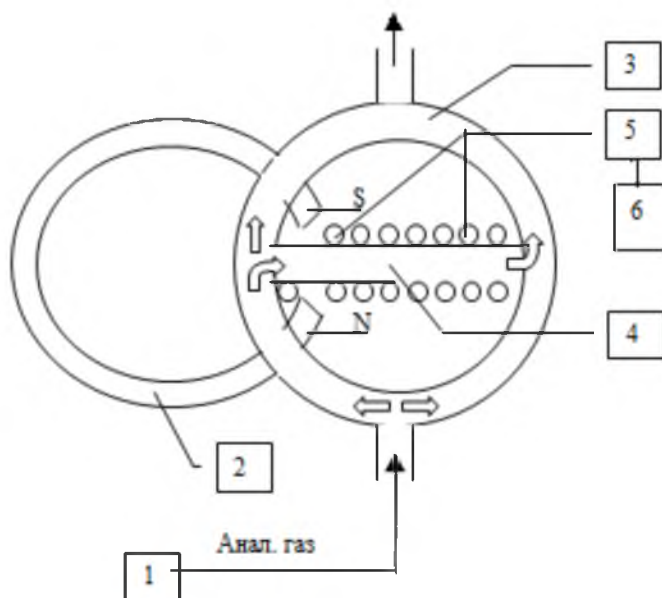


Рисунок 6.1 – Схема термомагнитного газоанализатора

Обозначения на схеме: 1 – блок подготовки; 2 – постоянный магнит; 3 – кольцевая камера; 4 – тонкостенная стеклянная трубка; 5 – неравновесный мост; 6 – потенциометр.

Принцип действия: при расположении в неоднородном магнитном поле проводника, нагреваемого электрическим током, за счет понижения магнитной восприимчивости кислорода, вызванного нагреванием, образуется движение газовой смеси, направленной от области большей напряженности магнитного поля к области меньшей напряженности. Анализируемый газ поступает из блока подготовки газа 1 в кольцевую камеру 3. По диаметру камеры установлена тонкостенная стеклянная трубка 4 с намотанными на ней терморезисторами теплового расходомера R1 и R2. Если в анализируемой смеси отсутствует кислород, то при горизонтальном положении трубки 4 поток газа через нее отсутствует.

Когда в анализируемом газе присутствует кислород O_2 , он втягивается в магнитное поле, создаваемое постоянным магнитом 2 около левого конца трубки. Затем кислород O_2 нагревается терморезистором R1 до t° выше точки Кюри ($\sim 80\text{ C}$), при которой кислород O_2 теряет парамагнитные свойства, становится диамагнетиком и выталкивается из магнитного поля (по стрелке). Возникает «магнитный ветер» – поток газа в трубке 4. Расход газа в трубке 4 измеряется тепловым расходомером. Разбаланс моста 5, определяемый объемной концентрацией кислорода O_2 в анализируемом газе, измеряется и регистрируется потенциометром 6.

Диапазон измерений от 0 –1% до 0 – 100%. Класс точности 2,5 – 5. Время реакции 120 сек.

6.3 Оптические газоанализаторы

Концентрация определяемого компонента измеряется по изменению оптических свойств газовой смеси, к числу которых относятся показатели преломления, спектрального поглощения и излучения, спектральная плотность и другие.

Оптические газоанализаторы можно подразделить на три группы:

- инфракрасного и УФ - поглощения;
- спектрофотометрические;
- фотокалориметрические.

Оптические газоанализаторы обладают *большой разрешающей способностью*, благодаря чему они применяются для анализа *микрokonцентраций* взрывоопасных и токсичных примесей в промышленных газах, при контроле воздуха в атмосфере и производственных помещениях.

Каждый газ характеризуется определенным спектром поглощения: газы, содержащие в своем составе 2 и более разнородных атомов (CO , CO_2 , CH_4 , NH_3) имеют спектры поглощения в ИК – области спектра. Одноатомные газы характеризуются спектрами поглощения в УФ - области.

6.3.1 Инфракрасный газоанализатор.

Схема инфракрасного газоанализатора приведена на рисунке 6.2.

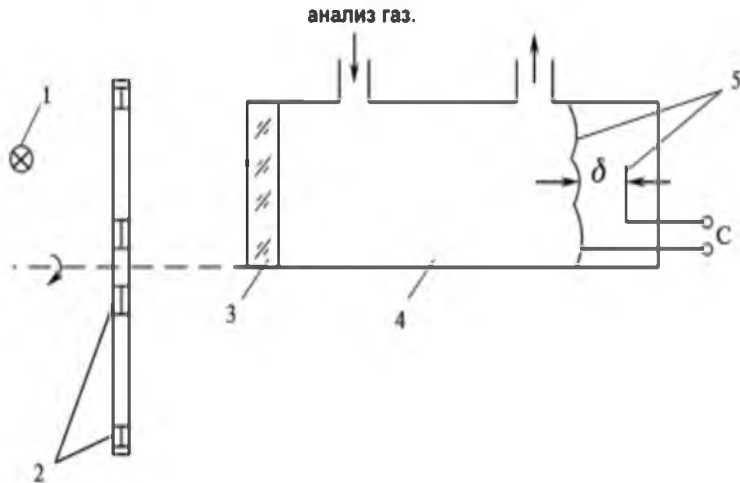


Рисунок 6.2 – Схема инфракрасного газоанализатора

Обозначения на схеме: 1 – источник постоянного излучения; 2 – вращающийся диск с отверстиями (обтюратор); 3 – светофильтр; 4 – камера; 5 – чувствительный элемент (микрофон).

Принцип действия ИК-газоанализатора: с помощью вращающегося диска 2 и светофильтра 3 постоянное излучение преобразуется в пульсирующее монохроматическое излучение. Анализируемый компонент в камере 4 поглощает излучение, при этом в камере возникает пульсация температуры t° , а следовательно, и давления. Пульсации давления P воспринимаются микрофонным чувствительным элементом 5, представляющим собой конденсатор, образованный подвижной мембраной и неподвижной пластиной. Под действием давления P мембрана перемещается, вызывая изменение емкости конденсатора C вследствие изменения зазора δ .

Приборы такого типа называют *оптико-акустическими*, т.к. первоначально обтюрация светового потока происходила со звуковой частотой.

Промышленные оптические газоанализаторы имеют сложные измерительные схемы, как правило, двухканальные.

Диапазоны измерения таких анализаторов от 0-1 до 0-100 %. Класс точности: 2,5-10 (в зависимости от диапазона измерения).

6.3.2 Ультрафиолетовый газоанализатор.

Большинство газов и паров обладают способностью поглощать УФ - излучение, однако ограниченное число их обладает спектрами поглощения, отличными от других газов.

Такие оптические газоанализаторы применяются для измерения наличия в воздухе токсичных паров ртути, хлора, карбонила никеля. В качестве источника УФ - излучения используются ртутные лампы. В качестве приемников излучения используются фоторезисторы, вакуумные фотоэлементы и фотоумножители.

Схемы могут быть как одноканальные, так и двухканальные.

6.4 Контрольные вопросы к главе 6

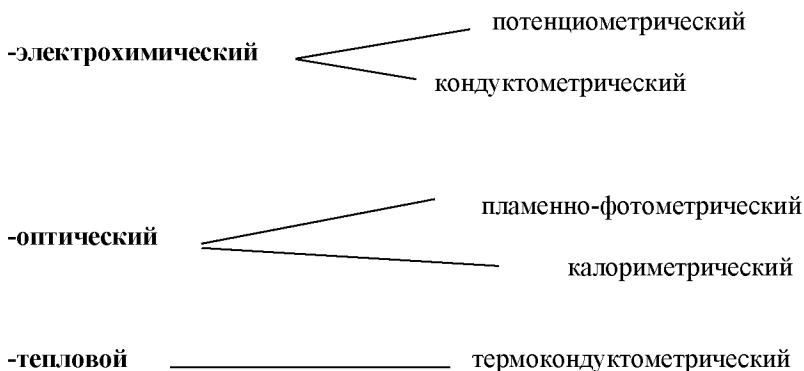
1. Аддитивность физико-химических свойств.
2. Дайте определения понятиям: многокомпонентная смесь, бинарная смесь, псевдобинарная смесь.
3. Парамагнитные и диамагнитные газы. Магнитная восприимчивость.
4. Схема и принцип действия магнитных газоанализаторов.
5. Классификация оптических газоанализаторов. Их особенности и область применения.
6. Как измеряется концентрация определяемого компонента?
7. Каким спектром поглощения характеризуются газы, содержащие в своем составе два и более разнородных атомов?
8. Каким спектром поглощения характеризуются одноатомные газы?
9. Схема и принцип действия инфракрасных газоанализаторов.
10. Принцип действия ультрафиолетовых газоанализаторов.

Глава 7. Анализ состава жидкостей

7.1 Общие сведения

Многие технологические процессы в энергетике основываются на результатах анализа состава жидкостей. Так, одним из важных моментов работы по охране окружающей среды является контроль за состоянием естественных и искусственных водоемов и анализ сбросных вод промышленных предприятий и населенных пунктов, которые осуществляются также с использованием анализаторов состава жидкостей.

Наиболее распространены в промышленных анализаторах методы анализа жидкостей:



7.2 Кондуктометрический метод анализа растворов

Изменяемыми величинами в данном методе являются *общая электропроводность, концентрация диссоциирующего вещества в растворе, кондуктометрическое титрование.*

Водные растворы электролитов представляют собой проводники 2-ого рода, перенос тока в которых осуществляется движением ионов. Ионы образуются при диссоциации веществ, находящихся в растворе. Электропроводность характеризует суммарную концентрацию находящихся в растворе ионов, в связи с чем приборы для измерения концентрации градуируют в единицах удельной электропроводности: См/см, или в единицах условного содержания (мг/кг NaCl), или концентрации (% H₂SO₄).

Удельная электропроводность χ – величина, обратная удельному сопротивлению, носит сложный характер зависимости от концентрации:

- 1) линейная зависимость при концентрации 5-10%;
- 2) рост концентрации > 15-30% сопровождается уменьшением электропроводности вследствие уменьшения степени диссоциации молекул.

Отсюда, необходимо заранее знать область работы кондуктометра, исключая возможность измерений в области экстремума.

Удельная электропроводность раствора сильно зависит от температуры:

$$\chi_t = \chi_{25} [1 + \alpha(t - 25) + \beta(t - 25)^2], \quad (7.1)$$

Теоретически чистая вода при $t = 25^\circ\text{C}$ обладает $\chi = 0,0055$ мкСм/см. При измерении малых концентраций растворенных веществ электропроводность воды создает фоновую составляющую.

На тепловых и атомных электростанциях конденсат перегретого и насыщенного пара, питательная и химически обессоленная вода, обладая малым содержанием, содержит растворенные газы CO_2 и NH_3 , которые образуют ионы H , NH_4 , OH , HCO_3 , CO_3 . В результате электропроводность воды, обусловленная концентрацией нелетучих компонентов, составляет проценты общей электропроводности.

Для уменьшения влияния на электропроводность растворенных газов используется Н-катионовые фильтры, производится дегазация пробы и ее концентрирование путем выпаривания.

Для измерения концентрации растворов по их электропроводности используют электродные и безэлектродные методы, последние менее распространены и применяются в основном для измерения концентрации кислот, щелочей.

7.2.1 Электродные кондуктомеры.

В общем случае электродный кондуктометр – это две погруженные в жидкость пластины (электроды), сопротивление раствора R_x между которыми связано с удельной электропроводностью:

$$R_x = \frac{l}{\chi S} = \frac{k}{\chi}, \quad (7.2)$$

где l , S – расстояние между электродами и их площадь,
 k – постоянная первичного преобразователя (датчика).

Постоянная первичного преобразователя определяется путем градуировки по образцовым растворам с известной электропроводностью.

Измерительные мосты, используемые для измерения сопротивления первичного преобразователя электропроводности, питаются переменным током. При использовании постоянного тока происходит поляризация электродов, образуется противодействующая ЭДС и возрастает сопротивление раствора.

Платиновые электроды обладают минимальным поляризационным сопротивлением и их применяют в лабораторных кондуктомерах при измерениях повышенной точности. *Электроды промышленных кондуктомеров* выполняются из нержавеющей стали.

При питании датчиков переменным током влияние поляризации электродов на результат измерения снижается по мере возрастания частоты f . Датчики промышленных кондуктомеров питаются переменным током $f=50$ Гц, в лабораторных кондуктомерах $f=(1\div 2)$ кГц от звуковых генераторов. Но при питании переменным током между электродами помимо активного сопротивления возникает и емкостное сопротивление, зависящее от диэлектрической проницаемости раствора. Этот комплексный характер сопротивления учитывается введением в одно из прилежащих плеч моста комплексного сопротивления.

Электродные преобразователи для промышленности разделяются на *магистральные, погружные и проточные*.

Магистральные преобразователи вводятся непосредственно в трубопровод, по которому течет анализируемый раствор. *Погружные преобразователи* опускаются в резервуар с контрольной жидкостью. Через *проточный преобразователь* протекает проба анализируемого раствора.

Кондуктомер АК-310 имеет диапазоны измерения 0-1, 0-10, 0-100 мкСм/см и выходной токовый сигнал 0-5 мА при предельной погрешности $\pm 5\%$.

К числу распространенных анализаторов жидкости относятся кондуктомеры серии КК, которые содержат как 2-х и 4-х электродные преобразователи, так и безэлектродные. Диапазон измерения от 10^{-6} до 1См/см при диапазоне работы $t^\circ=25\pm 15^\circ\text{C}$ и предельной основной погрешности $\pm 2,5\%$.

К недостаткам электродных кондуктометров относятся: поляризация и загрязнение электродов продуктами электрохимических реакций, протекающих на их поверхности, а также веществами, находящимися в растворах. Необходимо их периодическая механическая или химическая очистка и отмывка.

7.3 Потенциометрический метод анализа растворов

При погружении металлического электрода в раствор на его поверхности возникает потенциал, зависящий от активной концентрации ионов этого металла в растворе. Возникновение потенциала обусловлено переходом ионов металла в раствор. В состоянии равновесия поверхностный потенциал обеспечивает выравнивание скоростей анодного и катодного процессов, связанных с переходом ионов металла в раствор и из раствора в электрод. Измерение поверхностного потенциала электрода позволяет судить о концентрации соответствующих ионов в растворе.

Для равновесного поверхностного потенциала E необходимо замкнуть электрическую цепь, вводя в раствор второй электрод, называемый вспомогательным или электродом сравнения. Потенциал этого электрода в процессе измерения должен оставаться постоянным.

Если вспомогательный электрод – платиновый водородный, который принят в качестве нормального, то равновесные потенциалы электродов являются измеренными по так называемой водородной шкале и считаются нормальными.

Активная концентрация ионов в растворах выражается в единицах десятичного логарифма:

$$pH = -\lg a_{H^+}, \quad (7.3)$$

где a_{H^+} – активная концентрация ионов водорода в растворе.

Аналогично $pNa = -\lg a_{Na^+}$

Отсюда измерительные приборы называются *pH-метрами* и *pNa-метрами*.

Чистая вода – нейтральное вещество, слабо диссоциирующее с образованием ионов водорода H^+ и гидроксила OH^- .

При $t^\circ=22^\circ C$ константа диссоциации воды:

$$K_{H_2O} = a_{H^+} * a_{OH^-} = 10^{-14},$$

отсюда

$$a_{H^+} = a_{OH^-} = \sqrt{10^{-14}} = 10^{-7}, \text{ значит } pH = 7.$$

При растворении в воде кислот повышается концентрация ионов водорода H^+ , значит *pH снижается*. При растворении в воде щелочей уменьшается a_{H^+} , отсюда *pH возрастает*.

Таким образом, отклонение pH в водных растворах от 7 в ту или другую сторону характеризует меру их *кислотных или щелочных свойств*.

Для раствора аммиака $pH = 0,32,7$.

Для муравьиной кислоты $pH = 0,6,13$.

7.3.1 Рабочие и вспомогательные электроды потенциметрических анализаторов.

В данных анализаторах используются электроды 3-х типов:

- 1) металлические электроды или металлические с сорбированным на поверхности газом, как, например, водородный электрод;
- 2) система, включающая в себя металлический контактный электрод, его плохо растворимую соль и раствор, содержащий анионы этой соли;
- 3) электроды специального назначения, например, электроды с жидкостными мембранами.

В качестве *образцового электрода* для измерения числа pH растворов используется *водородный электрод*. Электрод представляет собой платиновую пластинку, покрытую слоем платиновой черни, на поверхности

которой хорошо сорбируется водород. Платиновая пластина погружается в раствор, через который пропускается водород под давлением.

При образовании первичного преобразователя из 2-х водородных электродов, из которых вспомогательный является нормальным, при $t^{\circ}=20^{\circ}\text{C}$ развивается ЭДС $E=0,058\text{pH}$, В. Необходимость подачи в электрод водорода, отравление пластины рядом химических веществ, присутствующих в растворах, обусловили их испытание только в качестве образцовых в лабораторной практике.

Для измерения pH в лабораторных и промышленных условиях используются *стеклянные рабочие электроды*, широкому распространению которых способствовала простота их устройства, высокие метрологические характеристики и широкий диапазон анализируемых сред. В стеклянных электродах водородными функциями обладает чувствительная тонкостенная мембрана, выполненная из литиевого или натриевого стекла.

Промышленные стеклянные электроды выпускаются нескольких модификаций, отличающихся диапазоном измерения pH, областью t° и давлений анализируемой среды. Для того, чтобы стеклянный электрод приобрел водородные функции, его перед включением вымачивают в дистиллированной воде.

В промышленных pH-метрах электродная система снабжается дополнительной арматурой, обеспечивающей размещение электродов на технологических объектах, их контакт с измеряемой средой и защиту электродов от механических воздействий.

Как и первичные преобразователи кондуктомеров, электродные системы pH-метров выпускаются следующих типов: *магистральные (ДМ), погружные (ДПг), проточные (ДПр)*.

7.3.2 Измерительные преобразователи pH-метров (рисунок 7.1).

Устройство приборов, предназначенных для измерения ЭДС электродной системы, определяется ее значительным внутренним сопротивлением и ограничением по величине протекающего через электроды тока, который для исключения поляризации электродов не должен превышать 10^{-12}A . Таким сопротивлением обладают приборы с высокоомным входом, основанные на компенсационном методе измерения.

Сигнал от электродной системы E_x при большом коэффициенте усиления усилителя практически полностью компенсируется напряжением U_{ab} и U_{bc} . Первое снимается с резистора R_3 , его величина зависит от положения движков переменных резисторов R_1 и R_2 . Их взаимное смещение устанавливается таким, чтобы $U_{ab}=E_x$, компенсируя сигнал электродной системы в изопотенциальной точке. Сигнал отрицательной обратной связи ООС снимается с цепи, включающей R_t и переменный резистор R_4 , с помощью последнего производится настройка прибора при отклонениях крутизны градуировочной характеристики электродной системы. Медный

резистор R_t погружен в анализируемый раствор и осуществляет температурную компенсацию. При увеличении t° раствора возрастает E_x , но при этом также возрастает R_t , благодаря чему при том же выходном токе обеспечивается соответствующее изменение сигнала компенсации U_{bc} .

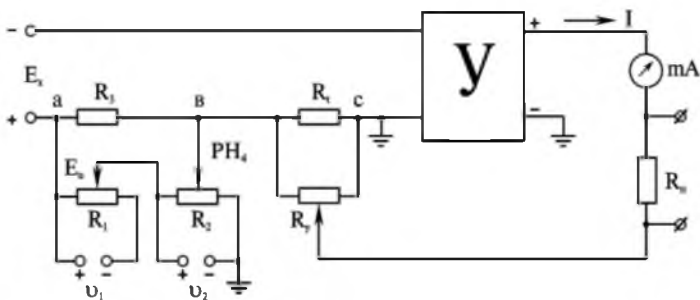


Рисунок 7.1 – Схема измерительного преобразователя рН-метра

В изопотенциальной точке $E_x = E_u = -U_{ab}$ и сигнал ООС U_{bc} должен быть равен нулю при наличии тока на выходе усилителя U . Выполнение этого условия обеспечивает исключение влияния изменений R_t в изопотенциальной точке. R_2 служит для настройки на изопотенциальную точку pH_u . R_1 – на потенциал E_u .

На рисунке 7.2 приведена градуировочная характеристика электродной системы. Результирующая ЭДС, развиваемая электродной системой, зависит от числа рН раствора и его t° . В точке (И) ЭДС не зависит от t° , в связи с чем она называется *изопотенциальной*.

Проверкой правильности настройки преобразователя на координаты изопотенциальной точки является отсутствие изменений выходного тока в изопотенциальной точке при изменении R_t .

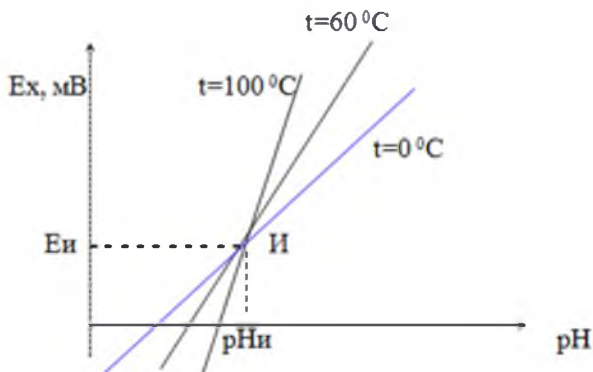


Рисунок 7.2 – График градуировочной характеристики электродной системы

К числу наиболее распространенных отечественных рН-метров относятся приборы рН-201 и рН-261. Их измерительные преобразователи имеют выходные сигналы по постоянному $U=0\div 50\text{мВ}$, и $I=0\div 5\text{мА}$.

Прибор рН-201 имеет 5 диапазонов: 1; 2,5; 5; 10; 15 рН.

Предельная допустимая погрешность $\pm 1\%$ от диапазона измерения.

7.4 Контрольные вопросы к главе 7

1. Классификация методов анализа жидкости.
2. Расскажите о кондуктометрическом методе анализа растворов.
3. Дайте определения понятиям: удельная электропроводность, удельное сопротивление.
4. Принцип действия электродного кондуктомера.
5. Классификация электродных преобразователей и их особенности.
6. Расскажите о потенциометрическом методе анализа растворов.
7. Почему анализаторы растворов называют *pH*-метрами и *pNa*-метрами?
8. Расскажите о влиянии чистой воды на кислотные и щелочные свойства растворов.
9. Виды электродов потенциометрических анализаторов.
10. Схема и принцип действия измерительных преобразователей *pH*-метров.

Список литературы

1. Датчики/под ред. В.М. Шарапов и др. – М.: «Техносфера», 2012.
2. Джексон Р.Г. Новейшие датчики. – М.: «Техносфера», 2010.
3. Иванова Г.М., Кузнецова Н.Д., Чистяков В.С. Теплотехнические измерения и приборы. – М: Энергоиздат, 2010. - 232 с.
4. Медведева Р.В. Средства измерений. - М.: «Кнорус», 2011.
5. Раннев Г.Г. Методы и средства измерений. – М., 2010.
6. Справочник инженера по контрольно-измерительным приборам и автоматике. / Под ред. А.В. Калиниченко. – М., 2010.
7. Хан С.Г. Технологические измерения и приборы. Учебное пособие. – Алматы: АУЭС, 2012.
8. Хан С.Г. Ибрагимова М.В. Технические средства измерений. Методические указания к выполнению лабораторных работ для студентов всех форм обучения специальности 5В070200 – Автоматизация и управление. – Алматы: АУЭС, 2014. – 48 с.
9. Хан С.Г. Технические средства измерений. Конспект лекций для студентов всех форм обучения специальности 5В070200 – Автоматизация и управление. – Алматы: АУЭС, 2014. – 58 с.
10. Хан С.Г. Технические средства измерений. Методические указания к выполнению расчетно-графических работ для студентов всех форм обучения специальности 050702 – Автоматизация и управление. – Алматы: АИЭС, 2010. – 22 с.
11. Шишмарев В.Ю. Технические измерения и приборы. – М.: «Академия», 2010.



RS Global

УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ

ХАН Светлана Гурьевна
ТЛЕУБАЕВА Жанна Серикбаевна

ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЙ

Passed for printing 06.07.2020. Appearance 08.07.2020.

Typeface Times New Roman.

Circulation 300 copies.

RS Global Sp. z O.O., Warsaw, Poland, 2020

Numer KRS: 0000672864

REGON: 367026200

NIP: 5213776394