



Автономная некоммерческая профессиональная образовательная организация
«МЕЖДУНАРОДНЫЙ ВОСТОЧНО-ЕВРОПЕЙСКИЙ КОЛЛЕДЖ»

Пушкинская ул., д. 268, 426008, г. Ижевск. Тел.: (3412) 77-68-24. E-mail: mveu@mveu.ru, www.mveu.ru
ИНН 1831200089. ОГРН 1201800020641

МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ К ЛАБОРАТОРНЫМ РАБОТАМ

при изучении профессионального модуля ПМ 02. СООРУЖЕНИЕ И ЭКСПЛУАТАЦИЯ ОБЪЕКТОВ ТРАНСПОРТА, ХРАНЕНИЯ, РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ГАЗА, НЕФТИ, НЕФТЕПРОДУКТОВ

**21.02.03 «Сооружение и эксплуатация газонефтепроводов и
газонефтехранилищ»**

Ижевск 2022 г.

Раздел 1. Технология металлов и трубопроводостроительных материалов.

ЛР 1. Нормализация углеродистой стали

Отжиг стали.

Отжигом называется операция термической обработки, при которой путем нагрева, выдержки при установленных температурах и последующего медленного охлаждения в стали получают устойчивую структуру, свободную от остаточных напряжений. Цель отжига стальных изделий — снять внутренние напряжения, устранить структурную неоднородность, улучшить обрабатываемость резанием и подготовить к последующей термической обработке.

Отжиг стали может быть с фазовой перекристаллизацией: полный, изотермический, на зернистый перлит и диффузионный, а также без фазовой перекристаллизации — рекристаллизационный.

Рис. 1. Интервалы температур для различных видов отжига и нормализации углеродистой стали

Отжиг включает следующие операции.

1. Нагрев стали до температур, на $20\text{—}30^\circ$ превышающих верхнюю критическую точку A_{C1} , т. е. лежащих выше линии GS, — полный отжиг для доэвтектоидных сталей (рис. 1), или нагрев стали до температур, на $30\text{—}40^\circ$ превышающих нижнюю критическую точку A_{C1} т. е. расположенных выше линии PSK, — неполный отжиг.
2. Выдержка детали в течение времени, достаточного для равномерного прогрева ее по всему сечению до заданных температур и для завершения всех структурных (фазовых) превращений, которые должны полностью закончиться. Законченность структурных превращений в стали при отжиге составляет цель данной операции: лишь в этом случае свойства стали после отжига существенно улучшаются.
3. Медленное охлаждение стали от температур отжига со скоростью, меняющейся (от 10 до 100° в час) в зависимости от марки стали, формы и назначения детали.

Полному отжигу подвергают обычно доэвтектоидные стали, нагревая их до температур выше линии GS, выдерживая при них в течение $\frac{1}{4}$ продолжительности нагрева и медленно охлаждая вместе с печью до $600\text{—}400^\circ\text{C}$. Углеродистые стали охлаждают со скоростью $100\text{—}150^\circ$ в час, легированные — со скоростью $30\text{—}50^\circ$ в час. Полный отжиг сопровождается фазовой перекристаллизацией, в результате чего

крупнозернистая сталь получает мелкозернистую структуру, освобождается от внутренних напряжений, становится мягкой и вязкой. Для отжига изделия упаковывают в ящики, трубы или реторты, которые затем наполняют песком, чугунной стружкой или углем, чтобы предохранить поверхность изделий от обезуглероживания и окисления. Наилучшие результаты дает применение защитной атмосферы. Отжиг в защитной атмосфере называют светлым, так как при этом способе обезуглероживания и окисления почти не бывает и поверхность изделий остается относительно светлой.

Неполный отжиг является разновидностью отжига перекристаллизации. При неполном отжиге сталь нагревают до температуры, на $30\text{—}40^\circ$ превышающей нижнюю критическую точку A_{C1} (см. рис. 1), т. е. до $750\text{—}760^\circ\text{C}$.

Замедленное охлаждение или длительная выдержка стали при температурах $680\text{—}750^\circ\text{C}$ способствует образованию крупнопластинчатого перлита, облегчающего обрабатываемость стали резанием. Для мягких доэвтектоидных сталей, содержащих до $0,4\text{—}0,5\%$ углерода, этот вид отжига применяют редко, так как они и без отжига достаточно хорошо обрабатываются резанием. Для инструментальных сталей, особенно заэвтектоидных, неполный отжиг является единственным видом отжига. Он способствует снятию внутренних напряжений и улучшению обрабатываемости резанием.

Отжигу на зернистый перлит подвергают эвтектоидные и заэвтектоидные стали. Для отжига сталь нагревают на $20\text{—}30^\circ$ выше критической точки A_{C1} (см. рис. 54) и после выдержки при рабочей температуре в течение $3\text{—}5$ часов медленно охлаждают (со скоростью $30\text{—}50^\circ$ в час) до $650\text{—}600^\circ\text{C}$. В результате длительной выдержки пластинчатый перлит превращается в зернистый; это явление называется сфероидизацией (округлением). Высокоуглеродистые инструментальные стали, содержащие более $0,65\%$ углерода, со структурой зернистого перлита хорошо обрабатываются резанием и лучше поддаются закалке; они обладают меньшей склонностью к образованию трещин и короблению. В некоторых случаях, чтобы ускорить процесс сфероидизации перлита, нагрев и охлаждение повторяют несколько раз. Такой отжиг называется **маятниковым**, или **циклическим**. При циклическом отжиге инструментальную сталь нагревают до $730\text{—}750^\circ\text{C}$ и медленно охлаждают до 650°C ; процесс повторяют несколько раз. Все заэвтектоидные (инструментальные) стали отжигают на зернистый перлит.

Изотермический отжиг заключается в нагреве стали выше критической точки A_{C3} и выдержке при этой температуре в течение времени, необходимого для полного и равномерного прогрева. Затем сталь относительно быстро охлаждают до температуры ниже A_{T1} ($650\text{—}700^\circ\text{C}$).

При этой постоянной (изотермической) температуре сталь выдерживают определенное время, необходимое для полного распада аустенита с образованием перлита (в доэвтектоидной стали — феррита и перлита), и затем охлаждают на воздухе. Изотермический отжиг имеет почти вдвое более короткий цикл, чем обычный отжиг.

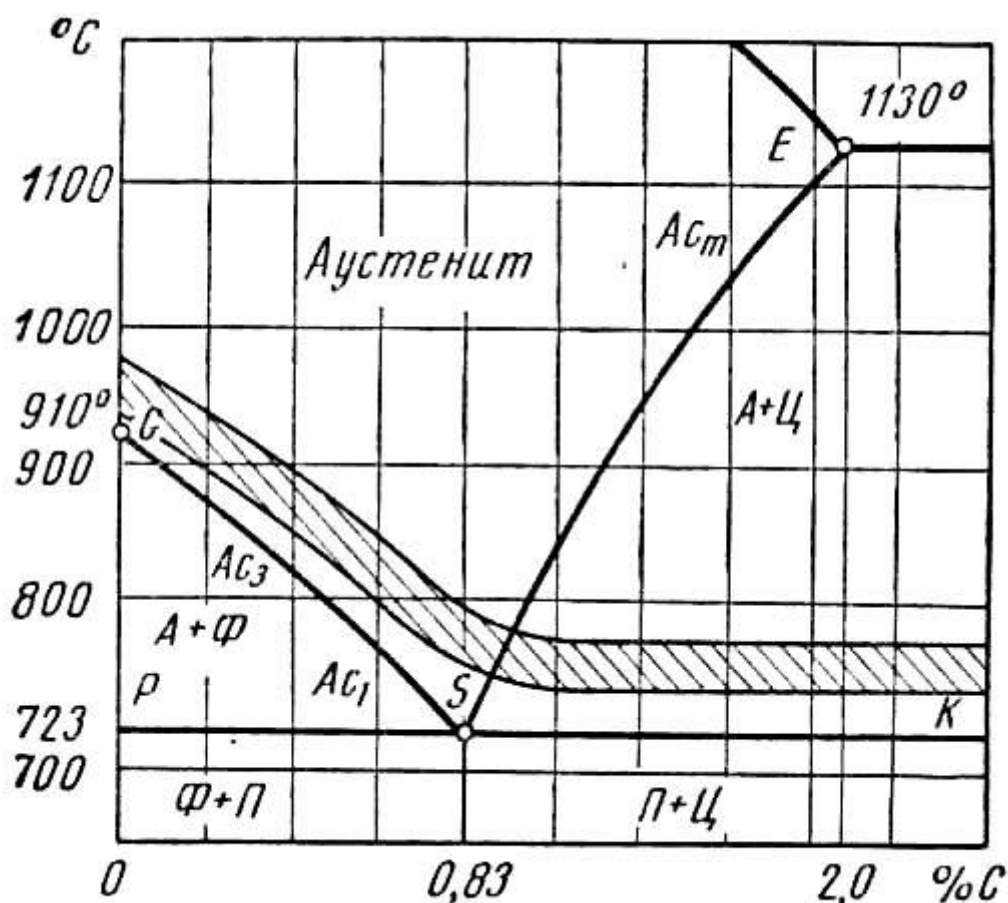


Рис. 2. Интервал закалочных температур углеродистой стали

Преимущества изотермического отжига — однородность структуры и ускорение процесса, особенно при отжиге легированной стали. Для сталей, содержащих большое количество хрома, никеля и других элементов, только изотермический отжиг позволяет добиться превращения весьма устойчивого аустенита в перлит и феррит и обеспечить хорошую обрабатываемость стали режущим инструментом. **Диффузионный отжиг** применяют для слитков и крупных отливок, чтобы выравнять (путем диффузии) химический состав стали, имеющий внутрикристаллическую ликвацию. Сталь нагревают до 1050—1150° С, выдерживают при этой температуре 10—15 часов и затем медленно охлаждают до 600 — 550° С. Диффузионный отжиг приводит к росту зерна стали; этот дефект устраняют повторным отжигом на мелкое зерно (полный отжиг). Сталь, прошедшая гомогенизацию, обладает более

высокими механическими свойствами; особенно повышается ударная вязкость.

Рекристаллизационным отжигом называется отжиг стали, прошедшей холодную прокатку, волочение или холодную штамповку, с выдержкой при температуре 680—700° С и последующим охлаждением. Этой температуры достаточно для того, чтобы вернуть стали свойства, которые она имела до холодной обработки давлением. В результате такого отжига понижается твердость и прочность, но повышаются показатели пластичности — относительное удлинение, ударная вязкость.

Нормализация стали.

Нормализацией называется нагрев стали выше линии GSE на 30—50° (см. рис. 1) с выдержкой при этой температуре и последующим охлаждением на воздухе. Нормализацию применяют для устранения внутренних напряжений и наклепа, повышения механических свойств стали.

Слово «нормализация» указывает на то, что сталь после этой операции получает нормальную, однородную, мелкозернистую структуру; перлит приобретает тонкое строение. Нормализации подвергают отливки и поковки. В настоящее время нормализация распространена в машиностроении больше, чем отжиг, так как она более производительна и дает лучшие результаты.

ЛР2.Определение прокаливаемости стали методом торцевой закалки

Легированием называется внесение в состав сплава специальных легирующих элементов с целью улучшения свойств материала.

По назначению легированные стали классифицируются в соответствии с улучшенными свойствами: коррозионностойкие (нержавеющие - в основном хромистые), антифрикционные (износостойкие), жаростойкие (окалиностойкие), быстрорежущие (с вольфрамом), жаропрочные, магнитотвердые, хромоникелевые (высокопрочные) и т.д.

Часть легирующих элементов (Si, Mn, Ni и др.) растворяются в феррите. Получающиеся при этом легированные стали *перлитного класса* в отожженном состоянии обладают несколько большей твердостью, чем углеродистые. Все легирующие элементы, особенно Mn, Si, Ni, повышают твердость и прочность ферритатом в большей степени, чем больше растворенный в нем элемент искажает решетку α -Fe.

Другая часть легирующих элементов (V, Cr, W, Mo, Ti) могут вступать в химические соединения с углеродом. При высоком содержании карбидообразующих элементов, характерном для инструментальных сталей *карбидного (ледебуритного) класса* (например, быстрорежущие стали P9, P18 и др.), образуются карбиды, относящиеся к фазам внедрения (типа Mo_3C). Такие стали обладают очень высокой твердостью, так как частицы этих фаз затрудняют движение дислокаций.

Изменение количественного состава легирующих элементов, вводимых в сталь, а также введение одновременно нескольких компонентов приводит к появлению новых свойств. Общий объем легирующих добавок в конструкционных сталях обычно не превышает 5-6 %.

У легированных сталей достигается большая прочность при сохранении или улучшении пластичности: при относительном удлинении при разрыве 50%:

углеродистая сталь имеет прочность $\sigma_b = 600-800 \text{ МПа}$;

сталь, легированная одним элементом - 850 МПа;

сталь, легированная двумя элементами - 950 МПа;

сталь, легированная тремя элементами - 1100 МПа;

Особенности термообработки легированных сталей. *Влияние легирующих элементов на структурные превращения.* Легирующие элементы оказывают определенное влияние на положение критической точки A_c в диаграмме состояния железоуглеродистых сплавов:

Ni, Mn, Zn - понижают температуру A_c ;

Cr, Si, V, W, Mo, Ti и др. - повышают температуру A_c ;

Температура нагрева под закалку легированных сталей поэтому несколько отличается от температуры закали соответствующих по содержанию углерода углеродистых сталей и берется, как правило, равной $A_c + (30-50^{\circ}\text{C})$.

Для сталей карбидного (ледебуритного) класса необходимы высокие температуры нагрева для возможно более полного растворения вторичных карбидов и получения высоколегированного аустенита (например, для быстрорежущей стали необходим нагрев до температуры 1220-1290°C).

Введение в сталь легирующих элементов увеличивает (за исключением Co) устойчивость переохлажденного аустенита в области перлитного и бейнитного превращения.

Повышение устойчивости переохлажденного аустенита уменьшает критическую скорость закали ($V_{кр}$) для легированных сталей по сравнению с углеродистыми. Например:

при введении 1,0% Cr в сталь с 1,0% C критическая скорость закали уменьшается в 2 раза;

при введении 0,4% Mo в сталь с 1,0% C критическая скорость закали снижается с 200°C/с до 50°C/с, сильно снижают критическую скорость - Mn, Ni;

в меньшей степени - W;

Для многих легированных сталей критическая скорость закали снижается до 20-30°C/с и ниже, что обеспечивает получение мартенситной структуры при охлаждении в масле и на воздухе.

Более медленное охлаждение при закалке создает меньшие внутренние напряжения, что является повышающим конструктивную прочность фактором.

Растворенные в аустените легирующие элементы обычно понижают температуру начала мартенситного превращения M_n и температуру конца мартенситного превращения M_k аустенита в легированных сталях:

Легирующий элемент в количестве 1,0% снижает M_n :

Mn - на 45°C; Cr - на 35°C; Ni - на 26°C; Mo - на 25°C; W - на 30°C.

Легирующий элемент в количестве 1,0% наоборот повышает M_n :

Co - на 12°C; Al - на 18°C.

Температура конца мартенситного превращения M_k некоторых марок стали, легированных Mn, Cr, V и другими элементами, лежит ниже 0°C, поэтому в закаленных легированных сталях, даже при небольшом содержании углерода, после охлаждения до комнатной температуры может сохраниться значительное количество остаточного аустенита. Для высоколегированных сталей с большим содержанием углерода (например, быстрорежущих сталей) количество остаточного аустенита достигает 40% и более. Остаточный аустенит может быть переведен в мартенсит охлаждением до температуры M_k непосредственно после закали (обработка холодом) или посредством многократного высокого отпуска.

Прокаливаемость сталей.Важной характеристикой термически обрабатываемых сталей является их прокаливаемость -способность стали получать в результате закалки структуру мартенсита или мартенсита и троостита, а следовательно, и высокую твердость на ту или иную глубину по сечению детали (рис.1).

Если изделия должны отличаться высокими свойствами по всему их сечению, когда действующие напряжения распределены по сечению однородно и отличаются высоким уровнем значений, необходимо выбирать стали с высокой прокаливаемостью, чтобы по всему сечению при закалке образовывалась мартенситная структура, а после отпуска деталей - структура сорбита.

Для изделий, работающих в условиях изгиба или кручения, когда максимальные напряжения, возникающие при эксплуатации, действуют в поверхностном слое, целесообразно применять стали с небольшой прокаливаемостью, у которых после закалки структура мартенсита находится в основном в пределах слоя, воспринимающего основную нагрузку.

Высокая устойчивость переохлажденного аустенита легированных сталей обеспечивает их основную особенность: более глубокую прокаливаемость по сравнению с углеродистыми сталями:

углеродистые - до 15 мм;

легированные 1% Cr - до 20 мм;

хромоникелевые - до 70 мм;

хромомарганцевые - до 40 мм;

легированные 0,001-0,005% В - до 150 мм.

Поэтому легированные конструкционные стали целесообразно применять только для термически обрабатываемых деталей сечением более 30 мм. Чем больше размер деталей, тем более легированную сталь следует использовать для ее изготовления.

Преимущества легированных сталей

Преимущества использования легированных сталей в деталях машин заключаются в следующем:

1. Большая прокаливаемость вследствие меньших значений критической скорости закалки. Сквозная прокаливаемость возможна для деталей значительно больших размеров;
2. При медленном охлаждении меньше термических напряжений, меньше остаточных напряжений и закалочных трещин. Возможны закалка без брака больших деталей, термообработка деталей сложной ажурной формы;
3. Устойчивость мартенсита при нагреве. При эксплуатации допустимы большие, чем для углеродистых сталей, рабочие температуры без изменений структуры;
4. Полное снятие закалочных напряжений при высоком отпуске. Возможны более высокие нагрузки при эксплуатации деталей;
6. Большинство легирующих элементов измельчает зерно, что повышает конструкционную прочность и снижает порог хладноломкости.

Экспериментальная оценка прокаливаемости сталей

У конструкционных сталей наличие наряду с мартенситной структурой некоторого количества троостита (до 10-20%) мало изменяет твердость и поэтому затрудняет определение толщины слоя с чисто мартенситной структурой. На практике за показатель прокаливаемости берут глубину слоя с полумартенситной структурой, т.е. определяют расстояние от охлаждаемой поверхности до слоя с твердостью HRC M, соответствующей

твердости тростомартенсита при данном содержании углерода. При содержании мартенсита < 50% наступает резкое снижение твердости.

У инструментальных заэвтектоидных сталей в закаленном состоянии твердость полумартенситной структурой сильно зависит от содержания более мягкой фазы - остаточного аустенита, количество которого может значительно изменяться при различных составах и условиях обработки стали. Наличие карбидов повышает суммарное содержание углерода намного выше его содержания в мартенсите. Поэтому определение прокаливаемости сталей с высоким содержанием углерода сильно затруднено.

Таблица 1. Твердость слоя со структурой 50% мартенсита и 50% троостита

Содержание углерода, %		HRC M	Содержание	HRC M сталей	
		сталей	углерода, %		
Углеродист.	Легиров.	Углеродист.	Легиров.		
0,08-0,17	0,18-0,22	0,23-0,27	-	0,33-0,42	0,43-0,52
0,28-0,32				0,53-0,62	Инструм.
					>60 >60

Во многих случаях необходимо экспериментальное определение прокаливаемости сталей. Существует несколько методов ее определения.

Закаливают цилиндрический (или квадратный) образец и ломают его посередине (пилить трудно), шлифуют излом и затем определяют твердость по диаметру через 2 мм в зависимости от радиуса слоя. Строят график, характеризующий прокаливаемость стали для деталей данного диаметра. Для получения более полной характеристики необходимо повторять определение для образцов разного диаметра и охлаждать их в различных ваннах. Прокаливаемость характеризуют баллами по специальной шкале, составленной для образцов квадратного сечения со стороной 20 мм.

Для более глубоко прокаливающихся сталей, принимающих закалку при охлаждении в масле, используют метод торцевой закалки по ГОСТ 5657-69.

Прокаливаемость определяют на образцах диаметром 25 мм и длиной 100 мм. На поверхности образца не допускается обезуглероженный слой и окалина.

Для измерения твердости по длине закаленного образца сошлифовывают при интенсивном охлаждении с двух противоположных сторон по диаметру образца слой толщиной 0,5 мм. На шлифованных площадках проводят измерение твердости по Рокуэллу или Виккерсу через каждые 1,5 мм у охлаждаемого торца и через каждые 3 мм дальше по длине образца.

Результаты испытаний выражают графически или числом прокаливаемости. Графическое изображение выполняют в координатах "твердость - расстояние от охлаждаемого торца" в виде кривых прокаливаемости. Для характеристики прокаливаемости стали одной марки, как правило, строят полосу прокаливаемости по результатам испытаний нескольких образцов. По этим данным и по специальным номограммам можно оценить прокаливаемость деталей из данной стали разного сечения.

Число прокаливаемости согласно ГОСТ определяется величиной L, где L - расстояние в мм от охлаждаемого торца, с твердость HRC M полумартенситного слоя согласно табл. 1. Так если HRC M составляет 45 HRC, а расстояние L равно 10,5 мм, тогда число прокаливаемости будет 10,5.

ЛР 3.Термическая обработка (закалка и отпуск) углеродистой стали

Термическая обработка – это технологический процесс, состоящий из нагрева и охлаждения материала изделия с целью изменения его структуры и свойств.

На стадии изготовления деталей необходимо, чтобы металл был пластичным, нетвердым, имел хорошую обрабатываемость резанием.

В готовых изделиях всегда желательно иметь материал максимально прочным, вязким, с необходимой твердостью.

Такие изменения в свойствах материала позволяет сделать термообработка. Любой процесс термообработки может быть описан графиком в координатах температура-время и включает нагрев, выдержку и охлаждение. При термообработке протекают фазовые превращения, которые определяют вид термической обработки. Температура нагрева стали зависит от положения ее критических точек и выбирается по диаграмме состояния Fe – Fe₃C в зависимости от вида термической обработки (рис.9.1.).

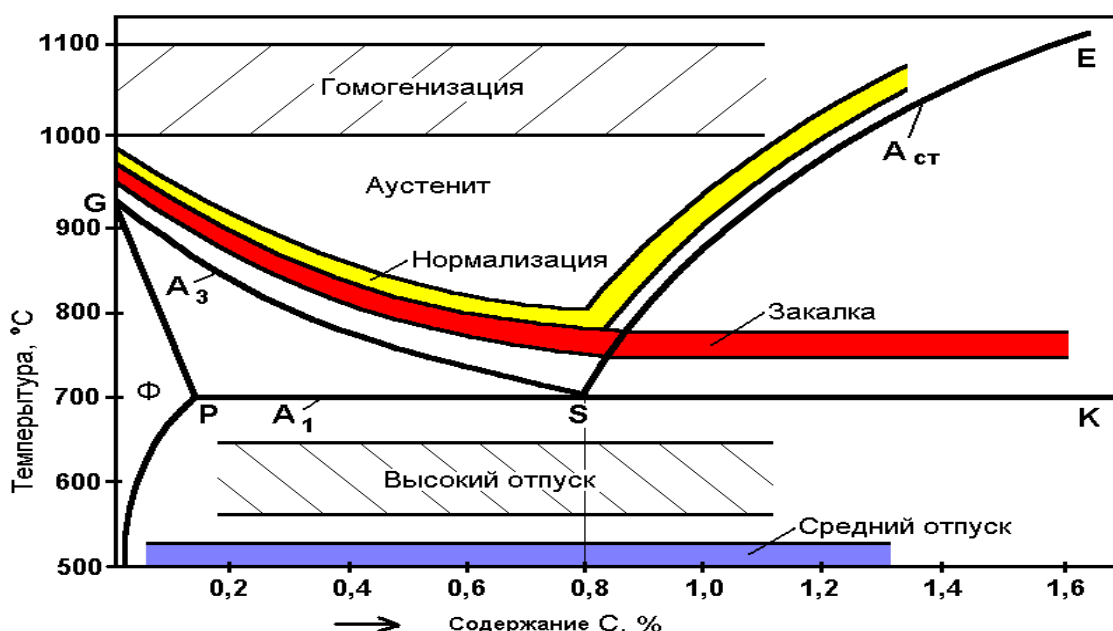


Рис. 5.1. Диапазон оптимальных температур нагрева при различных видах термообработки

Рис.9.1. Интервалы рекомендуемых температур нагрева при различных видах

Критические точки (температуры фазовых превращений)

определяют: линия PSK – точку A₁, GS – точку A₃ и SE – точку A_{cm}. Нижняя критическая точка A₁ соответствует превращению A ↔ P при 727°C. Верхняя критическая точка соответствует началу выделения феррита из аустенита (при охлаждении) или концу растворения феррита в аустените (при нагреве). Температура линии SE, соответствующая началу выделения вторичного цементита из аустенита, обозначается A_{cm}.

Время нагрева до заданной температуры зависит, главным образом, от химического состава стали и толщины наиболее массивного сечения детали (в среднем 60 с на каждый миллиметр сечения).

Выдержка при температуре термообработки необходима для завершения фазовых превращений, происходящих в металле, выравнивания температуры по

всему объему детали. Продолжительность выдержки зависит от химического состава стали и для нелегированных сплавов определяется из расчета 60 с. на один миллиметр сечения.

Скорость охлаждения зависит, главным образом, от химического состава стали, а также от твердости, которую необходимо получить.

Самыми распространенными видами термообработки сталей являются закалка и отпуск. Производятся с целью упрочнения изделий. Температура нагрева под закалку выбирается по диаграмме железо-углерод.

Закалка сталей

ЗАКАЛКОЙ называется фиксация при комнатной температуре высокотемпературного состояния сплава. Основная цель закалки – получение высокой твердости, прочности и износостойкости. Для достижения этой цели стали нагревают до температур на 30 – 50^оС выше линии GSK (рис. 9.1), выдерживают определенное время при этой температуре и затем быстро охлаждают. Для доэвтектоидных сталей температура нагрева под закалку определяется $A_{с3}+(30-50)^{\circ}C$, для эвтектоидных и заэвтектоидных $A_{с1}+(30-50)^{\circ}C$.

Процессы, происходящие в сплаве на различных стадиях закалки, можно рассмотреть на примере эвтектоидной стали У8. В исходном отожженном состоянии эта сталь имеет структуру перлита (эвтектоидная смесь феррита и цементита). При достижении температуры A_1 (727 ^оС) произойдет полиморфное превращение, т.е. перестройка кристаллической решетки феррита (ОЦК) в решетку аустенита (ГЦК), вследствие чего растворимость углерода резко возрастает. В процессе выдержки весь цементит растворится в аустените и концентрация углерода в нем достигнет содержания углерода в стали, т.е. 0,8 %

Следующий этап – охлаждение стали из аустенитной области до комнатной температуры – является определяющим при закалке. При охлаждении стали ниже температуры A_1 происходит обратное полиморфное превращение, т.е. решетка аустенита (ГЦК) перестраивается в решетку феррита (ОЦК) и при этом растворимость углерода уменьшается в 40 раз (с 0,8 до 0,02). Если охлаждение происходит медленно, то “лишний” углерод успевает выйти из решетки феррита и образовать цементит. В результате формируется структура феррито-цементитной смеси. Если же охлаждение производится быстро, то после полиморфного превращения углерод остается вследствие подавления диффузионных процессов в решетке ОЦК. Образуется пересыщенный твердый раствор углерода в α -железе, который называется **МАРТЕНСИТОМ**. Перенасыщенность мартенсита углеродом создает в его решетке большие внутренние напряжения, которые приводят к искажению ее формы и превращению из кубической в тетрагональную. Уровень внутренних напряжений оценивается степенью тетрагональности.

Чем выше степень тетрагональности решетки мартенсита, тем выше его твердость. Степень тетрагональности, в свою очередь, будет зависеть от содержания углерода в стали.

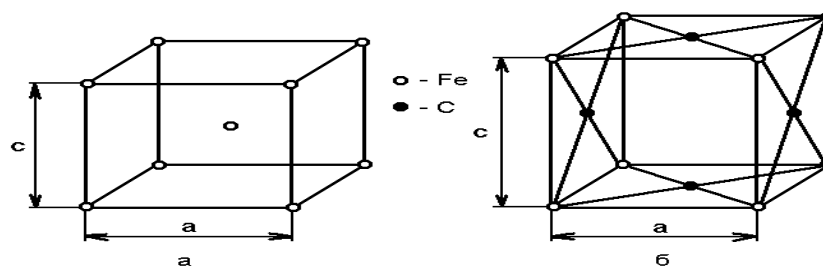


Рис. 5.3. Кристаллическая решётка феррита ($c/a=1$) (а) и кристаллическая решётка мартенсита ($c/a>1$) (б)

Рис. 9.2. Кристаллическая решетка феррита ($c/a=1$) (а) и кристаллическая решетка мартенсита ($c/a > 1$) (б)

Получить структуру мартенсита (или закалить сталь) можно только в том случае, если обеспечить скорость охлаждения больше или равную критической ($V_{кр}$) (рис 9.3), чтобы не успели пройти процессы распада аустенита в верхнем районе температур.

КРИТИЧЕСКАЯ СКОРОСТЬ заковки или минимальная скорость охлаждения ($V_{кр}$) – это скорость, при которой аустенит переходит в мартенсит. Если же скорости охлаждения будут меньше $V_{кр}$, при распаде аустенита получим феррито-цементитные смеси различной дисперсности **ТРООСТИТ**, **СОРБИТ** И **ПЕРЛИТ**.

Перлит (грубодисперсионная смесь феррита и цементита) может быть получен при очень медленных скоростях охлаждения (на рис. 10- это скорость V_1). Такие скорости охлаждения характерны для отжига (охлаждение вместе с печью).

При охлаждении углеродистых сталей на воздухе (вид термообработки – нормализация) со скоростями V_2 и V_3 получаем структуры сорбита и троостита. Сорбит – механическая смесь феррита и цементита средней дисперсности. Троостит – мелкодисперсная феррито-цементитная смесь. Свойства сорбита и троостита занимают промежуточное положение между свойствами перлита (П) и мартенсита (М).

Практической целью заковки является получение максимальной прочности и твердости стали. Достигается эта цель при следующих режимах: нагрев стали на $30 - 50^\circ\text{C}$ выше линии GSK, выдержка при этой температуре и охлаждение со скоростью $\geq V_{кр}$.

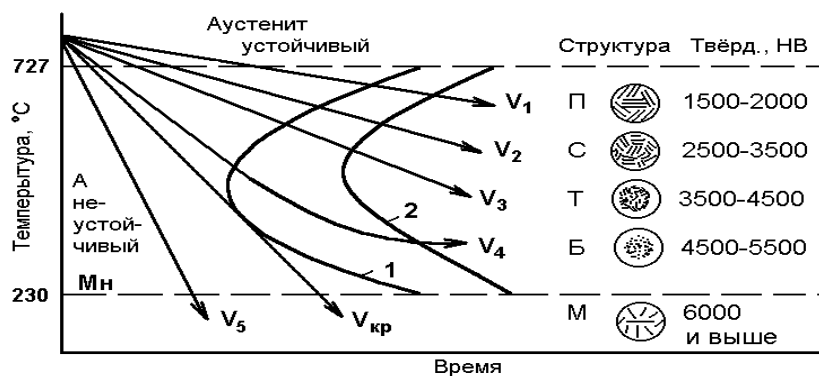


Рис. 5.4. Диаграмма изотермического распада аустенита эвтектоидной стали со схемами микроструктур и их примерной твёрдостью: 1 - кривая начала диффузионного распада аустенита; 2 - кривая конца диффузионного распада аустенита; Мн - линия начала мартенситного превращения; $V_{кр}$ - критическая скорость охлаждения

Рис 9.3. Диаграмма изотермического распада аустенита эвтектоидной стали со схемами микроструктур и их примерной твердостью: I – кривая начала диффузионного распада аустенита; II – кривая конца диффузионного распада аустенита; Мн – линия начала мартенситного превращения; $V_{кр}$ – критическая скорость охлаждения.

Отпуск сталей

К важнейшим механическим свойствам сталей наряду с твердостью относится и пластичность, которая после закалки очень мала. Структура резко-

неравновесная, возникают большие закалочные напряжения. Чтобы снять закалочные напряжения и получить оптимальное сочетание свойств для различных групп деталей, обычно после закалки проводят отпуск стали. Отпуском стали является термообработка, состоящая из нагрева закаленной стали до температуры ниже линии PSK (критическая точка A_1), выдержки при этой температуре и дальнейшего произвольного охлаждения. Этот процесс связан с изменением строения и свойств закаленной стали. При отпуске происходит распад мартенсита (выделение углерода), переход к более устойчивому состоянию. При этом повышается пластичность, вязкость, снижается твердость и уменьшаются остаточные напряжения в стали. Механизм протекающих превращений при отпуске сталей – диффузионный, он определяется температурой и продолжительностью нагрева.

Первое превращение, протекающее в интервале 80 – 200°C (низкий отпуск), соответствует выделению из мартенсита тонких пластин χ – карбида Fe_2C . Выделение углерода из решетки приводит к уменьшению степени ее тетрагональности. Полученный при этом мартенсит, имеющий степень тетрагональности, близкую к 1, называется отпущенным.

При нагреве закаленной стали до температур 300-450°C (средний отпуск) происходит полное выделение углерода из раствора и снятие внутренних напряжений. Сталь состоит из мелкодисперсной смеси феррита и цементита (троостит отпуска).

При нагреве до температур 480- 600 ° С (высокий отпуск) идет процесс коагуляции (укрупнения) карбидных частиц и максимальное снятие остаточных напряжений. Формируется структура сорбита отпуска.

В зависимости от температуры нагрева различают низкий, средний и высокий отпуск. Низкий отпуск проводят в интервале температур 80 – 250°С для инструментов-изделий, которым необходимы высокая твердость и износостойкость. Получаемая структура Мотп или Мотп + Ц_{II} (мартенсит отпуска + цементит вторичный).

Средний отпуск (350 – 500°С) применяется для рессор, пружин, штампов и другого ударного инструмента, т.е. для тех изделий, где требуется достаточная твердость и высокая упругость. Получаемая структура – Тотп (троостит отпуска).

Высокий отпуск (500 – 650°С) полностью устраняет внутренние напряжения. Достигается наилучший комплекс механических свойств: повышенная прочность, вязкость и пластичность. Применяется для изделий из конструкционных сталей, подверженных воздействию высоких напряжений. Структура – Сотп (сорбит отпуска).

Термообработку, заключающуюся в закалке на мартенсит и последующем высоком отпуске, называют улучшением.

ЛР4.Микроанализ химико-термически обработанных углеродистых и легированных сталей

Цель: Изучить микроструктуру термообработанных сталей или сталей подвергавшихся какой-либо технологической операции или легированию.

Оборудование: Металлографический микроскоп, набор микрошлифов, термически и химико-термически обработаны и легированы углеродистые стали.

Задание

1. Изучить микроструктуру доэвтектоидной стали до и после термической обработки
2. Схематически зарисовать изучаемые структуры, дать им характеристику и свойства, привести необходимые диаграммы, схемы
3. Составить отчёт в соответствии с пунктами задания

Ход работы

1. Изучить микроструктуру доэвтектоидной стали до и после термической обработки

Феррит и перлит. В доэвтектоидной стали после полного отжига, т. е. нагрева до температуры $A_{c3} + (20\text{--}30^\circ \text{C})$ и последующего медленного охлаждения вместе с печью, образуется мелкая, равномерная структура, состоящая из феррита и перлита (рис. 1), светлые участки -- зерна феррита, темные -- перлита.

Цементит и перлит. В заэвтектоидной стали после неполного отжига, т. е. нагрева до температуры $A_{c1} + (20\text{--}30^\circ \text{C})$ и последующего медленного охлаждения вместе с печью, образуется структура, состоящая из цементита и перлита; если цементит перлита и вторичный цементит находится в виде зерен, такая структура называется зернистым перлитом (рис. 2, а). Если отжиг не доведен до конца, то образуется смешанная структура зернистого и пластинчатого перлита (рис. 2, б).

Видманштеттова структура. Если доэвтектоидная сталь была нагрета до температуры значительно выше критической точки A_{c3} , например до $1000\text{--}1100^\circ \text{C}$, т. е. перегрета, то происходит значительный рост зерен, и при последующем медленном охлаждении образуется так называемая видманштеттова структура (рис. 3), характерная выделением феррита в виде крупных игл (пластин), расположенных внутри перлита под углом друг к другу с образованием треугольников. Механические свойства (особенно вязкость) стали с такой структурой низкие.

Микроструктура закаленной стали

Мартенсит. Основной структурой закаленной стали является структура мартенсита. Мартенсит -- пересыщенный твердый раствор углерода в α -железе $\text{Fe}_\alpha(\text{C})$. Мартенсит имеет характерное игольчатое строение (рис. 4). Размер игл мартенсита зависит от размера зерен аустенита. Чем мельче зерна аустенита, тем мельче получаются иглы мартенсита, а размер зерен аустенита зависит от температуры нагрева стали, увеличиваясь с ее повышением. Поэтому, чем выше температура нагрева, т. е. чем больше перегрев стали, тем более крупноигльчатым получается мартенсит (рис. 5; а). В доэвтектоидной (среднеуглеродистой) стали после нормальной закалки, т. е. нагрева до температуры $A_{c3} + (20\text{--}30^\circ \text{C})$ и последующего быстрого охлаждения в воде, образуется структура мелкоигльчатого мартенсита (рис. 5, б) или так называемого скрытокристаллического мартенсита (рис. 5, в).

Мартенсит и феррит. Если доэвтектоидная сталь была нагрета до температуры между критическими точками A_{c1} и A_{c8} , то при таком нагреве часть феррита не превратится в аустенит. После охлаждения аустенит превратится в мартенсит, а феррит останется в закаленной стали. В результате после закалки в воде получится структура мартенсит + феррит (рис. 5,б) с пониженной твердостью. Такая закалка будет неполной.

Микроструктура закаленной и отпущенной стали

Мартенсит отпуска. Микроструктура мартенсита отпуска образуется после низкотемпературного отпуска (до 200° С) закаленной на мартенсит стали. Отпущенный мартенсит похож на мартенсит закалки. Характерным является только то, что если в мартенсите после закалки иглы (пластины) светлые, то в мартенсите отпуска они темные (рис. 7). Изменение цвета игл мартенсита связано с изменениями, происходящими в мартенсите при низкотемпературном отпуске. При нагреве стали со структурой мартенсита до 200° С происходит выделение из пересыщенного твердого раствора углерода в α -железе мельчайших частичек цементита, но еще связанных с исходной фазой (α -раствором). При этом уменьшается степень тетрагональности мартенсита.

Троостит отпуска. Микроструктура троостита отпуска образуется после отпуска при 350--450° С стали, закаленной на мартенсит (рис. 8). Таким образом, троостит отпуска является продуктом распада мартенсита. Он представляет собой высокодисперсную смесь частиц феррита, мельчайших округлых зерен и коротких пластинок цементита.

Сорбит отпуска. Микроструктура сорбита отпуска образуется после отпуска при 500--600° С стали, закаленной на мартенсит (рис. 9). Таким образом, сорбит отпуска является продуктом распада мартенсита. Он представляет собой механическую смесь феррита и округлых зерен цементита, но более грубого строения, чем троостит. Иногда сорбит сохраняет форму игл мартенсита, из которого он был получен в результате отпуска закаленной стали. В этом случае при обычных увеличениях сорбит отпуска трудно отличить от мартенсита.

2. Схематически зарисовать изучаемые структуры, дать им характеристику и свойства, привести необходимые диаграммы, схемы

2.1. Просмотреть и изучить при увеличениях от 200 до 500 раз микроструктуры конструкционных сталей.

2.2. Зарисовать микроструктуру в кругах диаметром 60 мм. или в квадратах размером 60X60 мм.

2.3. Под каждой зарисованной микроструктурой дать подпись с указанием наименования стали, её химического состава, обработки, наименования структуры и увеличение.

2.4. На каждой зарисованной микроструктуре указать стрелками различные фазы и структурные составляющие и около стрелок, на полях, написать их наименование.

Рисунок 1 Доэвтектоидная сталь, травление 4%-ным спиртовым раствором азотной кислоты (g500): а - до отжига; б - после отжига

Рисунок 2 Заэвтектоидная сталь.

Рисунок 2 Доэвтектоидная сталь. Видманштеттова структура (g500)

Рисунок 3 Иглы мартенсита в закаленной высокоуглеродистой стали.

Рисунок 4 Мартенсит. а - крупноигольчатый; б - мелкоигольчатый; в - скрытокристаллический.

Рисунок 5 Доэвтектоидная сталь, недогретая при закалке - мартенсит и феррит.

Рисунок 6 Мартенсит: а - после закалки, светлые иглы мартенсита на темном фоне аустенита; б - после закалки и низкого отпуска, темные иглы мартенсита на светлом фоне аустенита.

Рисунок 7 Троостит отпуска

Рисунок 8 Сорбит отпуска

Рисунок 9 Область доэвтектоидных сталей

3. Составить отчёт в соответствии с пунктами задания

С помощью изучения микроструктуры термообработанных сталей или сталей подвергавшихся какой-либо технологической операции или легированию можно выявить структурные составляющие данной стали.

Теоретическая часть.

Наименьшая скорость охлаждения, при которой аустенит превращается в мартенсит, называется критической скоростью закалки. Мартенсит имеет игольчатое строение и высокую твердость (НВ 500— 650). Мартенситное превращение происходит в интервале температур M_n — M_k (где M_n — начало мартенситных превращений; M_k — конец мартенситных превращений), которые определяются содержанием углерода в стали.

Виды термической обработки стали: 1) отжиг первого рода или рекристаллизация;

2) отжиг второго рода; 3) нормализация; 4) закалка; 5) отпуск.

Отжиг первого рода (рекристаллизационный отжиг) — нагрев детали до температуры ниже фазовых превращений, выдержка при этой температуре и медленное охлаждение вместе с печью. Такой вид отжига применяют для снятия внутренних напряжений у деталей, полученных методом холодной деформации (холодная прокатка, холодная штамповка, волочение и др.), а также для уничтожения нагартовки (наклепа) металла.

Температура рекристаллизационного отжига любого металла должна быть выше температуры рекристаллизации данного металла. Температура рекристаллизационного отжига для разных металлов и сплавов различная. Например, для стали температура рекристаллизационного отжига на 150—250°С выше температуры рекристаллизации, обычно 680—700°С.

Рекристаллизация заключается в том, что, начиная с некоторой температуры при нагревании, происходит интенсивное перемещение атомов в металле, что влечет за собой изменение формы и величины деформированных кристаллических зерен. При этом происходят превращения, подобные происходящим при первичной кристаллизации и вторичной перекристаллизации (зарождаются новые центры кристаллов и одновременно происходит их рост). Взамен вытянутых расплюснутых зерен образуются мелкие, сфероидальные зерна; металлу возвращаются исходные свойства, т. е. понижается твердость, повышается пластичность.

Отжиг второго рода (отжиг с фазовыми превращениями) — нагрев детали до температуры несколько выше критической, выдержка при этой температуре и медленное охлаждение вместе с печью. Цель отжига — выровнять химический состав детали, получить мелкозернистую равновесную структуру, снять внутренние напряжения, повысить пластичность и понизить твердость, улучшить условия обрабатываемости резанием. Отжиг второго рода подразделяется на полный, неполный, изотермический ступенчатый и диффузионный.

Полный отжиг производят путем нагрева стали на 30—50°С, выше критической температуры $A_{с3}$, выдержки при этой температуре и медленном охлаждении. Полному отжигу подвергают доэвтектоидные и горячедеформируемые стали (поковки, штамповки, прокат, а также слитки и фасонные отливки из углеродистой и легированной стали).

Неполный отжиг производят, нагревая детали до температуры выше критической точки $A_{с1}$ на 30—50°С, выдержки при этой температуре и последующего медленного охлаждения. Неполный отжиг необходим для перекристаллизации перлита, снятия внутренних напряжений, улучшения обрабатываемости резанием. Применяется для эвтектоидных и заэвтектоидных сталей.

Нормализация — промежуточный процесс термической обработки между отжигом и закалкой. В зависимости от химического состава стали нормализацию применяют иногда вместо отжига или закалки. Нормализация отличается от отжига повышенной скоростью охлаждения (на стойком или движущемся воздухе). Процесс нормализации заключается в нагреве стали выше критических температур $A_{с3}$, $A_{сm}$ на 30—50°С, выдержке при этой температуре и охлаждении на воздухе. Нормализацией достигают измельчения и однородности структуры, устранения внутренних напряжений и уничтожения сетки вторичного цементита в заэвтектоидных сталях. Нормализации подвергают фасонные отливки, поковки, штамповки и прокатные материалы.

Закалка — это процесс, который заключается в нагреве стали выше критических температур $A_{с3}$, $A_{с1}$ на 30—50°С, выдержке при этой температуре и

последующем быстром охлаждении в воде, масле или других охлаждающих средах. Основная цель закалки — получение высокой твердости и прочности.

Резкое увеличение твердости и прочности в процессе закалки происходит за счет изменения структуры в процессе нагрева и охлаждения, за счет образования неравновесных твердых структур — мартенсита, троостита и сорбита.

Температура нагрева под закалку зависит от химического состава стали. Дозэвтектоидную углеродистую сталь нагревают выше критической температуры $A_{с3}$ на 30—50°C, а заэвтектоидную и эвтектоидную стали нагревают выше $A_{с1}$ на 30—50°C. Температура под закалку доэвтектоидной стали изменяется с изменением содержания в стали углерода, температура нагрева заэвтектоидных сталей постоянная и равна 770—780°C.

Нагрев деталей должен быть медленным, чтобы не возникали напряжения и трещины. Время нагрева зависит от химического состава стали, от формы и размеров детали (примерно 1,5 мин. на 1 мм толщины детали). Время выдержки должно быть достаточным, чтобы весь процесс превращения феррито-цементной смеси в аустенит полностью завершился. Продолжительность выдержки обычно 25% общего времени нагрева. Скорость охлаждения должна быть такой, чтобы обеспечить получение нужной структуры — мартенсита (охлаждение в воде), троостита (охлаждение в масле или соляном растворе), сорбита (охлаждение на движущемся воздухе или между металлическими плитами), т. е. обеспечить необходимые механические свойства обрабатываемой детали.

Для успешного проведения термической обработки правильный выбор закалочной среды имеет большое значение. Закалку среднеуглеродистых сталей производят в воде при температуре 18°C, а большинства остальных сталей — в масле. Объемная закалка в зависимости от способа охлаждения разделяется на следующие виды.

Закалка в одном охладителе углеродистых сталей (охлаждение в воде) и легированных сталей (охлаждение в масле) заключается в том, что нагретую до температуры закалки деталь погружают в закалочную среду и держат до ее полного охлаждения. Недостаток этого способа — возникновение больших термических напряжений из-за резкой разности температур нагретого металла и охлаждающей среды. Иногда для уменьшения внутренних напряжений делают подстуживание.

В двух средах. Сначала охлаждение в воде до температуры выше температуры начала мартенситного превращения, затем быстро в другую среду-масло, селитру или на воздухе. Такую закалку качественно может выполнить только высококвалифицированный термист.

Ступенчатую закалку производят быстрым охлаждением последовательно в двух различных охлаждающих средах. Первой охлаждающей средой служат расплавленные соли или масло с температурой на 20—30°C выше точки начала мартенситного превращения M_n для данной стали. В горячей среде деталям дают кратковременную выдержку, цель которой — выравнивание температур по

сечению детали. Структура металла — аустенит. Второй охлаждающей средой является воздух; при этом аустенит переходит в мартенсит.

Достоинство такого метода закалки — уменьшение термических напряжений, а следовательно, невозможность появления трещин, поводки и коробления, а также хорошее сочетание высокой вязкости с прочностью. Ступенчатую закалку применяют для мелких деталей из углеродистой стали с сечением 8—10 мм и для деталей из легированной стали с сечением до 30 мм.

Изотермическая закалка, так же как и ступенчатая закалка, производится в двух охлаждающих средах. Температура горячей среды (соляные, селитровые и щелочные ванны) зависит от химического состава стали. Время выдержки должно быть достаточным для полного превращения аустенита в игольчатый троостит. Окончательное охлаждение до комнатной температуры производится на воздухе.

Изотермическую закалку широко применяют для деталей из высоколегированных сталей. Для легированных сталей. Отпуск не производится.

После изотермической закалки сталь приобретает высокие прочностные свойства.

При охлаждении в процессе закалки в стали возникают термические и структурные внутренние напряжения. Термические напряжения возникают в результате неравномерного охлаждения, а структурные — при превращении аустенита в мартенсит, что сопровождается значительным увеличением объема. В результате создания таких напряжений при закалке может возникнуть брак — коробление, трещины и изменение объема.

Поверхностная закалка применяется для придания ответственным деталям (валам, зубчатым колесам и др.) работающим на трение и одновременно подвергающимся действию ударных нагрузок, твердости поверхностного слоя, высокого сопротивления изнашиванию и вязкости сердцевины, обеспечивающей сопротивление удару. В зависимости от способа нагрева деталей поверхностная закалка разделяется на индукционную (токами высокой частоты), контактную, газопламенную, закалку в электролите.

Индукционная закалка основана на том, что электрический ток высокой частоты, проходя по проводнику — индуктору, создает вокруг него электрическое поле. На поверхности детали, помещенной в это поле, индуцируются вихревые токи, вызывая нагрев детали до высоких температур. Это обеспечивает возможность протекания фазовых превращений, т. е. превращение феррито-цементитной смеси в аустенит. После охлаждения поверхность детали имеет структуру мартенсита.

Закалка с самоотпуском — деталь рабочей частью погружают в воду и вынимают после кратковременной выдержки. За счет той части детали, которая не погружалась в воду, рабочая часть детали нагревается. Температура нагрева определяется по цветам побежалости. Дальнейший нагрев прерывают немедленным охлаждением всей детали в воде.

Отпуск — это завершающая операция термической обработки, формирующая структуру, а следовательно, и свойства стали.

Назначение отпуска — снять внутренние напряжения, возникшие в процессе закалки, и получить необходимую структуру. Процесс отпуска заключается в нагревании стали до температуры ниже A_{c1} , A_{c3} выдержке при температуре и охлаждении. В зависимости от температуры нагрева закаленной детали различают три вида отпуска: низкий, средний и высокий.

Низкий отпуск производится при температуре 150—250°C с целью уменьшения закалочных напряжений при сохранении мартенситной структуры. Твердость детали после низкого отпуска почти не изменяется. Низкий отпуск применяется для углеродистых сталей, для которых необходимы высокая твердость и износостойчивость.

Средний отпуск производится при температурах нагрева 350—500°C и применяется для пружинных и рессорных сталей, а также для сталей, идущих на изготовление штампов.

Высокий отпуск производится при температурах нагрева 500—650°C и применяется для конструкционных сталей.

Кроме температуры нагрева при отпуске весьма важно время выдержки, скорость же охлаждения в большинстве случаев значения не имеет. Нагрев образцов стали для термообработки в лабораторных условиях проводят в муфельных электропечах.

Время на нагрев и выдержку в печи при заданной температуре для отжига, нормализации и закалки ориентировочно берется из расчета 1,5 минуты на каждый миллиметр диаметра или толщины детали.

Для низкого отпуска время выдержки при 200°C принимается равным 30 минутам, для среднего отпуска при 400°C – равным 20 минутам и высокого отпуска при 600°C – равным 10 минутам. Кроме того, для всех видов отпуска прибавляется по одной минуте на каждый миллиметр диаметра или толщины детали.

7.3. Химико-термическая обработка стали: цементация, азотирование, нитроцементация и диффузионная металлизация

Химико-термическая обработка стали

Химико-термическая обработка (ХТО) – процесс изменения химического состава, микроструктуры и свойств поверхностного слоя детали.

Изменение химического состава поверхностных слоев достигается в результате их взаимодействия с окружающей средой (твердой, жидкой, газообразной, плазменной), в которой осуществляется нагрев.

В результате изменения химического состава поверхностного слоя изменяются его фазовый состав и микроструктура,

Основными параметрами химико-термической обработки являются температура нагрева и продолжительность выдержки.

В основе любой разновидности химико-термической обработки лежат процессы диссоциации, адсорбции, диффузии.

Диссоциация – получение насыщающего элемента в активированном атомарном состоянии в результате химических реакций, а также испарения. Например, $\text{CH}_4 \rightarrow \text{C} + 2\text{H}_2$

Адсорбция – захват поверхностью детали атомов насыщающего элемента.

Адсорбция – всегда экзотермический процесс, приводящий к уменьшению свободной энергии.

Диффузия – перемещение адсорбированных атомов вглубь изделия.

Для осуществления процессов адсорбции и диффузии необходимо, чтобы насыщающий элемент взаимодействовал с основным металлом, образуя твердые растворы или химические соединения.

Химико-термическая обработка является основным способом поверхностного упрочнения деталей.

Основными разновидностями химико-термической обработки являются:

- цементация (насыщение поверхностного слоя углеродом);
- азотирование (насыщение поверхностного слоя азотом);
- нитроцементация или цианирование (насыщение поверхностного слоя одновременно углеродом и азотом);
- диффузионная металлизация (насыщение поверхностного слоя различными металлами).

Назначение и технология видов химико-термической обработки: цементации, азотирования нитроцементации и диффузионной металлизации

Цементация

Цементация – химико-термическая обработка, заключающаяся в диффузионном насыщении поверхностного слоя атомами углерода при нагреве до температуры 900...950 °С. Цементации подвергают стали с низким содержанием углерода (до 0,25 %).

Нагрев изделий осуществляют в среде, легко отдающей углерод. Подбирая режимы обработки, поверхностный слой насыщают углеродом до требуемой глубины.

Глубина цементации (h) – расстояние от поверхности изделия до середины зоны, где в структуре имеются одинаковые объемы феррита и перлита ($h = 1...2$ мм).

Степень цементации – среднее содержание углерода в поверхностном слое (обычно, не более 1,2 %).

Более высокое содержание углерода приводит к образованию значительных количеств цементита вторичного, сообщающего слою повышенную хрупкость.

На практике применяют цементацию в твердом и газовом карбюризаторе (науглероживающей среде).

Участки деталей, которые не подвергаются цементации, предварительно покрываются медью (электролитическим способом) или глиняной смесью.

Цементация в твердом карбюризаторе.

Почти готовые изделия, с припуском под шлифование, укладывают в металлические ящики и пересыпают твердым карбюризатором. Используется древесный уголь с добавками углекислых солей BaCO_3 , Na_2CO_3 в количестве 10...40 %. Закрытые ящики укладывают в печь и выдерживают при температуре 930...950 °C.

За счет кислорода воздуха происходит неполное сгорание угля с образованием окиси углерода (CO), которая разлагается с образованием атомарного углерода.

Образующиеся атомы углерода адсорбируются поверхностью изделий и диффундируют вглубь металла.

Недостатками данного способа являются:

- значительные затраты времени (для цементации на глубину 0,1 мм затрачивается 1 час);
- низкая производительность процесса;
- громоздкое оборудование;
- сложность автоматизации процесса.

Способ применяется в мелкосерийном производстве.

Газовая цементация.

Процесс осуществляется в печах с герметической камерой, наполненной газовым карбюризатором.

Атмосфера углеродосодержащих газов включает азот, водород, водяные пары, которые образуют газ-носитель, а также окись углерода, метан и другие углеводороды, которые являются активными газами.

Глубина цементации определяется температурой нагрева и временем выдержки.

Преимущества способа:

- возможность получения заданной концентрации углерода в слое (можно регулировать содержание углерода, изменяя соотношение составляющих атмосферу газов);
- сокращение длительности процесса за счет упрощения последующей термической обработки;
- возможность полной механизации и автоматизации процесса.

Способ применяется в серийном и массовом производстве.

На поверхности изделия образуется слой заэвтектоидной стали, состоящий из перлита и цементита. По мере удаления от поверхности, содержание углерода снижается и следующая зона состоит только из перлита. Затем появляются зерна феррита, их количество, по мере удаления от поверхности увеличивается. И, наконец, структура становится отвечающей исходному составу.

Термическая обработка после цементации

В результате цементации достигается только выгодное распределение углерода по сечению. Окончательно формирует свойства цементированной детали последующая термообработка. Все изделия подвергают закалке с низким отпуском. После закалки цементированное изделие приобретает высокую твердость и износостойкость, повышается предел контактной выносливости и предел выносливости при изгибе, при сохранении вязкой сердцевины.

Комплекс термической обработки зависит от материала и назначения изделия.

Если сталь наследственно мелкозернистая или изделия неответственного назначения, то проводят однократную закалку с температуры 820...850°C. При этом обеспечивается получение высокоуглеродистого мартенсита в цементированном слое, а также частичная перекристаллизация и измельчение зерна сердцевины.

При газовой цементации изделия по окончании процесса подстуживают до этих температур, а затем проводят закалку (не требуется повторный нагрев под закалку).

Для удовлетворения особо высоких требований, предъявляемых к механическим свойствам цементированных деталей, применяют двойную закалку.

Первая закалка (или нормализация) проводится с температуры 880...900°C для исправления структуры сердцевины.

Вторая закалка проводится с температуры 760...780°C для получения мелкоигльчатого мартенсита в поверхностном слое.

Завершающей операцией термической обработки всегда является низкий отпуск, проводимый при температуре 150...180°C. В результате отпуска в поверхностном слое получают структуру мартенсита отпуска, частично снимаются напряжения.

Цементации подвергают зубчатые колеса, поршневые кольца, червяки, оси, ролики.

Азотирование

Азотирование – химико-термическая обработка, при которой поверхностные слои насыщаются азотом.

При азотировании увеличиваются не только твердость и износостойкость, но также повышается коррозионная стойкость.

При азотировании изделия загружают в герметичные печи, куда поступает аммиак NH_3 с определенной скоростью. При нагреве аммиак диссоциирует по реакции: $2\text{NH}_3 \rightarrow 2\text{N} + 3\text{H}_2$. Атомарный азот поглощается поверхностью и диффундирует вглубь изделия.

Фазы, получающиеся в азотированном слое углеродистых сталей, не обеспечивают высокой твердости, и образующийся слой хрупкий.

Для азотирования используют стали, содержащие алюминий, молибден, хром, титан. Нитриды этих элементов дисперсны и обладают высокой твердостью и термической устойчивостью.

Типовые азотируемые стали: 38ХМЮА, 35ХМЮА, 30ХТ2НЗЮ.

Глубина и поверхностная твердость азотированного слоя зависят от ряда факторов, из которых основные: температура азотирования, продолжительность азотирования и состав азотируемой стали.

В зависимости от условий работы деталей различают азотирование:

- для повышения поверхностной твердости и износостойкости;
- для улучшения коррозионной стойкости (антикоррозионное азотирование).

Для повышения поверхностной твердости и износостойкости процесс проводят при температуре 500...560°C в течение 24...90 часов, так как скорость азотирования составляет 0,01 мм/ч. Содержание азота в поверхностном слое составляет 10...12 %, толщина слоя (h) – 0,3...0,6 мм. На поверхности получают твердость около 1000 HV. Охлаждение проводят вместе с печью в потоке аммиака.

Значительное сокращение времени азотирования достигается при ионном азотировании, когда между катодом (деталью) и анодом (контейнерной

установкой) возбуждается тлеющий разряд. Происходит ионизация азотосодержащего газа, и ионы бомбардируя поверхность катода, нагревают его до температуры насыщения. Катодное распыление осуществляется в течение 5...60 мин при напряжении 1100...1400 В и давлении 0,1...0,2 мм рт. ст., рабочее напряжение 400...1100 В, продолжительность процесса до 24 часов.

Антикоррозионное азотирование проводят и для легированных, и для углеродистых сталей. Температура проведения азотирования – 650...700°C, продолжительность процесса – 10 часов. На поверхности образуется слой— фазы толщиной 0,01...0,03 мм, который обладает высокой стойкостью против коррозии. (–фаза – твердый раствор на основе нитрида железа Fe_3N , имеющий гексагональную решетку).

Азотирование проводят на готовых изделиях, прошедших окончательную механическую и термическую обработку (закалка с высоким отпуском).

После азотирования в сердцевине изделия сохраняется структура сорбита, которая обеспечивает повышенную прочность и вязкость.

Раздел 2. Автоматизация производственных процессов

ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ.

Тема 2.1. Элементы систем автоматизации

Лабораторная работа № 1. Изучение принципа действия и проверка датчика давления.

Цель работы: изучить элементы систем управления такие, как датчики, коммутационные устройства, исполнительные устройства, клапаны.

Приборы для измерения температуры

Температура - это значение теплового состояния гомогенного вещества, т.е. величина средней кинетической энергии его молекул.

Тесный температурный контакт необходим между двумя телами для того, чтобы они приняли одинаковую температуру (выравнивание температуры). Измеряемое тело должно находиться в максимально тесном контакте, который возможен, с термометром.

Известнейшие методы измерения температуры базируются на свойствах веществ и тел, изменяющихся в зависимости от температуры.

Для измерения температуры применяют термометры расширения, сопротивления, термопары и манометрические термометры.

Термометры расширения служат для контроля температуры помещения, наружного воздуха и т. п. Чувствительный элемент представляет собой баллон с жидкостью, при нагревании которого жидкость расширяется и ее столбик поднимается в отсчетном

устройстве. Положение конца столбика относительно шкалы термометра соответствует температуре среды, в которой находится баллон.

Термометры сопротивления (ТС) применяют в системах, где требуется дистанционная передача показаний. Принцип работы таких термометров основан на свойстве металлов изменять удельное сопротивление при изменении температуры.

Чувствительные элементы термометров сопротивления выполняют из медной (термометры сопротивления медные – ТСМ) или платиновой (ТСП) проволоки, намотанной на каркас.

Каркас с чувствительным элементом 1 (рисунок 1) помещен в корпус защитной арматуры, выполняемый, как правило, из нержавеющей стали. Провода проходят в изолирующих керамических бусах 3 и подсоединяются к клеммам 5 головки термометра. К линии связи термометр подсоединяют через сальниковое уплотнение 4. На технологическом оборудовании термометр вставляют в гнездо и укрепляют штуцером 6.

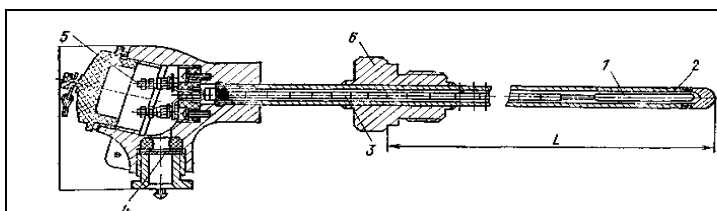


Рис. 1 Термометр сопротивления:
1 – чувствительный элемент, 2 – корпус, 3 – бусы, 4 – уплотнение, 5 – клеммы, 6 – штуцер

1 – чувствительный элемент; 2 – корпус; 3 – бусы;
4 – уплотнение; 5 – клеммы; 6 – штуцер.
Рисунок 1 – Термометр сопротивления

Термометры сопротивления предназначены для измерения температур от -200 до $+650^{\circ}\text{C}$, монтажная длина их до 2 м. Применение термометров сопротивления ограничено сравнительно низким диапазоном измерения и большими размерами каркаса чувствительного элемента (до 100 мм), не позволяющими измерять температуру в точке.

Термопары применяют для измерения температур в пределах до 1800°C . Действие термопары основано на следующем принципе. Если спаять два стержня из различных металлов, а затем спаянный (горячий) и свободные (холодные) концы поместить в среды с различными температурами, то между свободными концами стержней появляется разность потенциалов. Свободные концы стержней соединяют с приемником тока и получают электрическую цепь, в которой находится источник Э. Д. С.

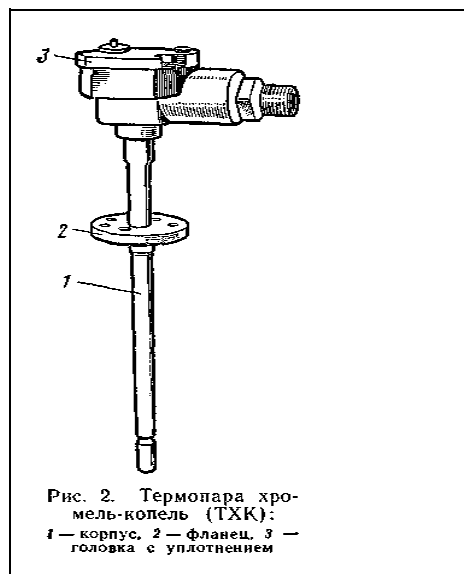


Рис. 2. Термопара хромель-копель (ТХК):
1 – корпус, 2 – фланец, 3 – головка с уплотнением

Величина термоэлектродвижущей силы (т.э.д.с.) в цепи зависит от разности температур, в которые помещены свободные и спаянный концы термопары, и от свойств металлов или сплавов, из которых изготовлены стержни.

1 – корпус; 2 – фланец;
3 – головка с уплотнением
Рисунок 2–Термопара ХК

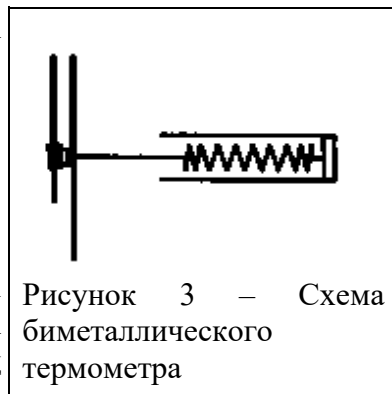
В промышленности применяют термопары из сплавов: хромель-копель (ХК), хромель-алюмель (ХА), платинородий-платина (ПП), платинородий (ПР).

Термопара устроена аналогично термометру сопротивления (рисунок 2). Чувствительный элемент, помещенный в корпус 1, представляет собой спай термоэлектродов, изготовленных из указанных выше металлов или сплавов, припаянный к серебряному диску (горячий конец). Термоэлектроды выведены через каналы изолирующих бус на клеммы головки 3 термопары. К корпусам аппаратов или трубопроводов термопару крепят штуцерами или фланцами.

Биметаллические термометры Полоска из двух свальцованных друг с другом пластин из металлов с различными коэффициентами расширения (биметалл), искривляется при изменении температуры (рисунок 3). Искривление находится в приблизительной пропорции с температурой.

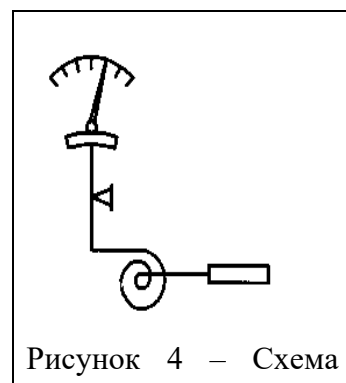
Биметаллическая пластина легла в основу двух различных измерительных элементов:

- винтовая пружина
- спиральная пружина



В результате механической деформации биметаллических пластин при изменении температуры в указанных элементах возникает вращательное движение. Если внешний конец биметаллической измерительной системы жестко закреплен, то другой конец без промежуточного элемента проворачивает вал указательной стрелки. Диапазоны показаний лежат между -70°C и $+600^{\circ}\text{C}$ при измерениях с классом точности 1 и 2.

Манометрические термометры применяют для измерения температуры в зоне аппарата. Принцип действия манометрических термометров основан на зависимости между температурой и давлением жидкости или газа при постоянном объеме. Измерительная система состоит из погружаемого элемента (рисунок 4), капиллярного провода и трубчатой пружины в корпусе.



Данные элементы соединены в единое устройство, которое под давлением заполнено инертным газом. Изменение температуры влечёт изменение объема или внутреннего давления в погружаемом устройстве. Давление деформирует измерительную пружину, отклонение которой передается с помощью стрелочного механизма на стрелку. Колебания температуры окружающей среды не принимаются во внимание, так как для компенсации между стрелочным механизмом и измерительной пружиной встроен биметаллический элемент. Диапазоны показаний лежат в пределах между $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $+700\text{ }^{\circ}\text{C}$

манометрического
термометра

Приборы для измерения давления

Манометры с упругим чувствительным элементом

Манометры с упругим чувствительным элементом широко распространены благодаря своей прочности и простоте обращения. Они содержат чувствительные элементы, которые упруго меняют свою форму под воздействием давления. Как правило, чувствительные элементы исполняются из медных сплавов, легированных сталей или из специальных материалов, если речь идет о специфических измерительных задачах.

Давление измеряется по отношению к исходному давлению (эталонное давление). В качестве исходного давления служит, как правило, атмосферное давление. Это означает, что манометр указывает насколько измеренное давление ниже или выше атмосферного давления, присутствующего в момент измерений (манометр избыточного давления). Манометры с гидрозаполнением используются для измерения давления в условиях сильных пульсаций или вибраций. Функцию сигнализации можно обеспечить путем комбинирования манометра с электроконтактами. Для автоматизации производственных процессов манометры комбинируются с датчиком выходного электрического сигнала, например 4-20 мА.

По форме пружины и принципам они разделяются на:

Манометры с трубчатой пружиной

Трубчатые пружины представляют собой кругообразно согнутые трубки с овальным поперечным сечением. Давление измеряемой среды воздействует на внутреннюю сторону этой трубки, в результате чего овальное поперечное сечение принимает почти круглую форму. В результате искривления пружинной трубки возникают напряжения в кольцах трубки, которые разгибают пружину. Не зажатый конец пружины выполняет движение, пропорциональное величине давления. Движение передается посредством стрелочного механизма на шкалу. Для измерений давления до 40 или 60 бар применяются, как правило, согнутые с углом витка около 270° , кругообразные пружины. Для измерений давления с более высокими значениями используются пружины с несколькими лежащими друг над другом витками и одинаковым витковым диаметром (винтовая пружина) или со спиралеобразными витками, лежащими в одной плоскости

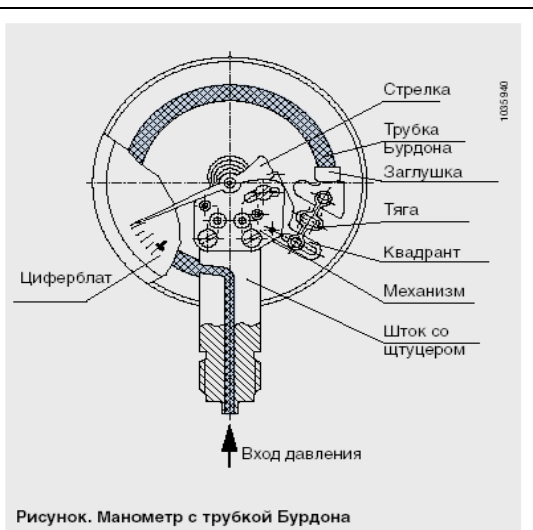


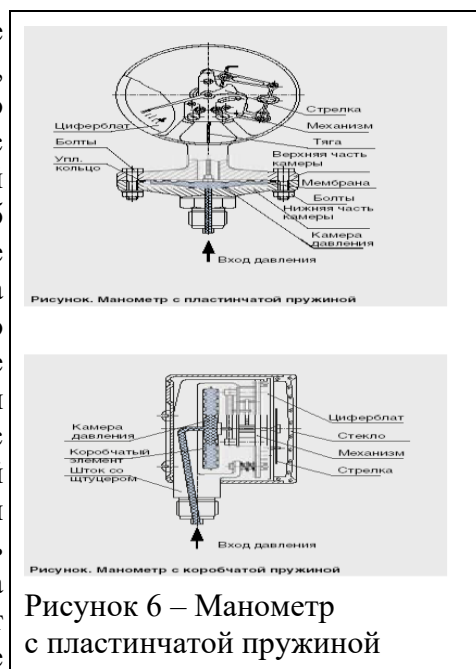
Рисунок. Манометр с трубкой Бурдона

Рисунок 5 – Манометр с трубкой Бурдона

(плоская спиральная пружина). Трубчатые пружины обладают сравнительно низким перестановочным усилием. Поэтому их защита от перегрузки может проводиться только с ограничениями.

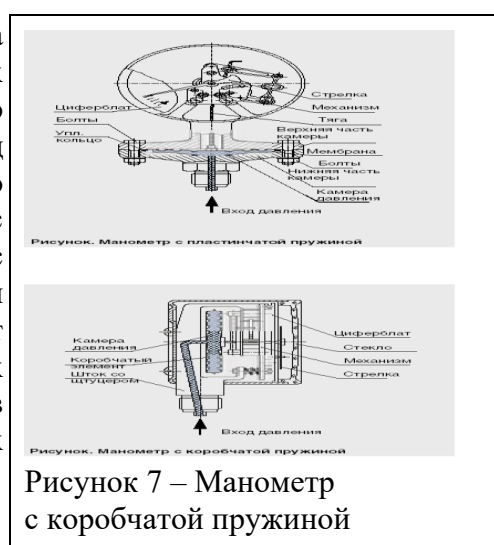
Манометры с пластинчатой пружиной.

Пластинчатые пружины представляют собой тонкие гофрированные мембраны кругообразной формы, которые зажимаются или привариваются по краю между двумя фланцами и вступают в соприкосновение с измеряемой средой только с одной стороны. Вызванный в результате такого соприкосновения прогиб пропорционален величине давления. Движение передаётся посредством стрелочного механизма на шкалу. Пластинчатые пружины обладают сравнительно высоким перестановочным усилием. В результате кольцеобразного крепления пластинчатые пружины менее восприимчивы к вибрациям по сравнению с трубчатыми пружинами, однако погрешность показаний при изменениях температуры у них больше. Благодаря опорам для мембран достигается повышенная стойкость к перегрузкам. Покрытия или фольга, наносимые на поверхность пластинчатых пружин обеспечивают защиту от коррозионных измеряемых сред. Широкие соединительные отверстия или открытые соединительные фланцы, а также возможности по промывке делают пластинчатые пружины, особенно пригодными при работе с высоковязкими, загрязненными или кристаллизующимися веществами. Диапазоны показаний лежат в пределах 0 ... 16 мбар и 0...40 бар с классом точности 1,6 и 2,5. Более высокий класс точности обеспечивают манометры с плоскими пружинами в специальном исполнении.



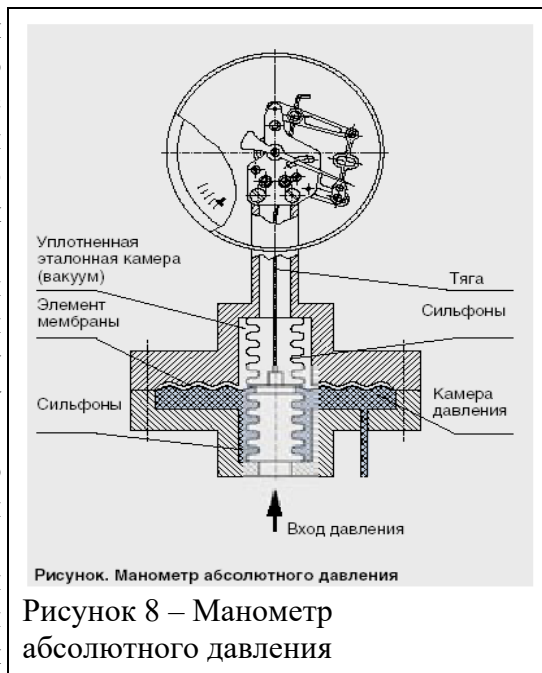
Манометры с коробчатой пружиной

Давление измеряемой среды воздействует на внутреннюю сторону коробки, состоящей из двух кругообразных, гофрированных, герметично прилегающих друг к другу мембран. Возникающее под давлением поступательное движение пропорционально величине давления. Движение передается на шкалу с помощью стрелочного механизма. Манометры с коробчатой пружиной особенно пригодны для измерений давления газообразных сред. Защита от перегрузки возможна только в определенных границах. Для повышения чувствительности в манометре может устанавливаться ряд коробчатых пружин (“пакет” коробчатых пружин).



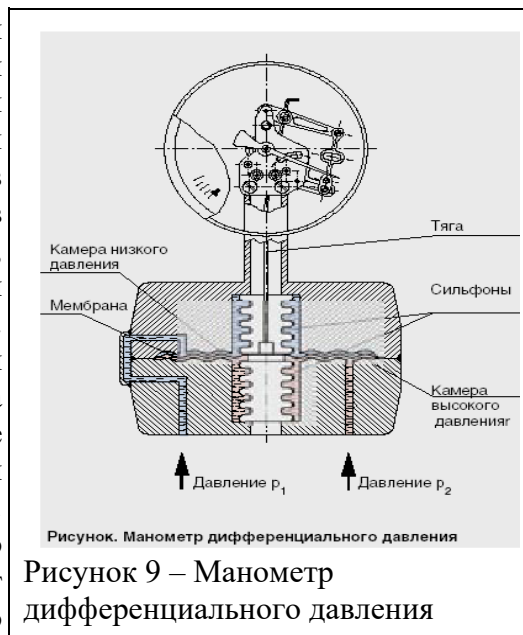
Манометры абсолютного давления

Данные приборы используются для измерений давления независимо от колебаний атмосферного давления окружающей среды. В соответствии с различными сферами применения и диапазонами показаний, манометры для измерений абсолютного давления изготавливают согласно принципам измерений и формам чувствительных элементов, которые применяются в манометрах для измерений относительного давления. Давление измеряемой среды определяется по отношению к базовому давлению, которое равняется абсолютному давлению с величиной 0 (= абсолютный вакуум). Это означает, что на стороне измерительного элемента, не соприкасающейся с измеряемой средой, должно присутствовать базовое давление. Присутствие базового давления при использовании соответствующей формы пружин достигается посредством вакуумирования и герметизации соответствующей измерительной камеры или облегающего корпуса. Передача движения измерительного элемента и индикация давления осуществляются аналогично выше описанным манометрам относительного давления.



Манометры дифференциального давления

Приборы дифференциального давления применяются для измерений разницы между двумя отдельными давлениями. Базовым давлением является то, которое присутствует на стороне, взятой за эталонную. В качестве чувствительных элементов используются пружины тех же форм, что и в манометрах относительного давления. Как правило, чувствительные элементы подвергаются воздействию давления с обеих сторон. Установленная таким образом разность давлений передается с помощью стрелочного механизма непосредственно на шкалу. Если измеряемые давления одинаковы, измеряемый элемент остается неподвижным и показания прибора отсутствуют. Измерение низких разностных давлений возможно даже при высоком статическом давлении. Защита от высоких перегрузок обеспечивается с помощью пластинчатых чувствительных элементов. При выборе манометра следует учитывать допустимое статическое (рабочее) давление, а также максимально допустимую перегрузку. Для преобразования деформации чувствительного элемента в показания стрелки используются принципы, аналогичные принципам действия манометров избыточного давления.



Приборы для измерения расхода жидкостей

Для измерения расходов жидкостей и газов используют в основном два вида расходомеров – расходомеры переменного перепада и постоянного.

Расходомер переменного перепада. В основу принципа действия положено измерение перепада давления на сопротивлении, введенном в поток жидкости или газа.

Любая движущаяся система характеризуется соотношением ее кинетической и потенциальной энергий. Для жидкостей или газов, протекающих в трубопроводе, кинетическая энергия будет определяться скоростью движения среды через поперечное сечение трубопровода, а потенциальная – давлением в трубопроводе. При увеличении скорости протекания среды давление падает, и наоборот, т. е. происходит превращение одного вида энергии в другой.

В трубопровод, в котором необходимо измерить расход, вводят сопротивление, уменьшающее площадь поперечного сечения трубы.

В месте установки сопротивления скорость жидкости резко возрастает. Если измерять давление до сопротивления и непосредственно за ним, то разность давлений (перепад) будет зависеть от скорости потока, а следовательно, и от расхода. Такие сопротивления, устанавливаемые в трубопроводах, называются сужающими устройствами. В качестве сужающих устройств в системах контроля расхода применяют нормальные диафрагмы.

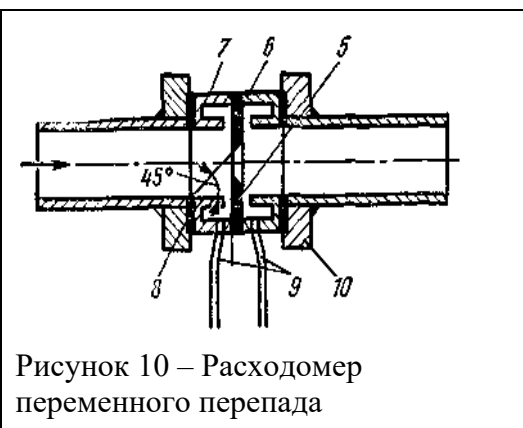


Рисунок 10 – Расходомер переменного перепада

Комплект диафрагмы состоит из диска 5 (рисунок 10) с отверстием, кромка которого с плоскостью диска составляет угол 45° . Диск 5 помещается между корпусами кольцевых камер 6 и 7. Между фланцами 10 и камерами 6 и 7 установлены уплотняющие прокладки 8. Отборы давления 9 до и после диафрагмы берут из кольцевых камер.

Применение сужающих устройств ограничено диаметрами трубопроводов ($d > 50$ мм) и, следовательно, величиной измеряемого расхода (не ниже $25 \text{ м}^3/\text{ч}$).

Расходомеры постоянного перепада применяют для измерения расходов до $20 \text{ м}^3/\text{ч}$. Преобразователь постоянного перепада устроен следующим образом. Внутри расширяющегося патрубка или трубы с диафрагмой 2 (рисунок 11) помещают поплавки 3 конической формы, свободно перемещающийся в трубе. При восходящем потоке жидкости или газа на диафрагме 2 создается перепад давлений, который уравнивается массой поплавка 3. При увеличении расхода перепад увеличивается и поплавок 3 перемещается вверх до тех пор, пока площадь кольцевого зазора между поплавком 3 и диафрагмой 2 не увеличится до

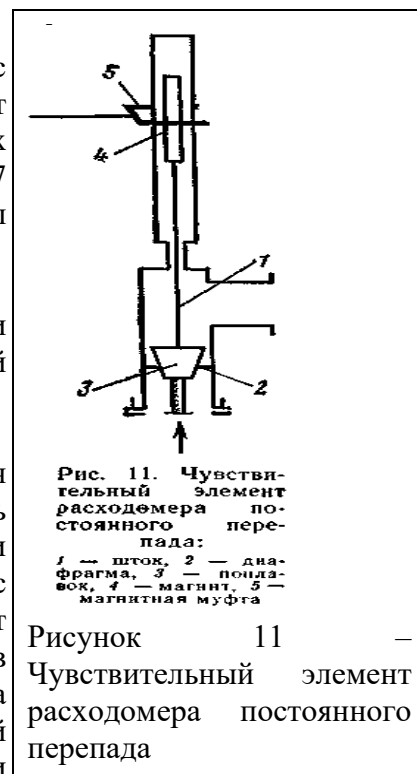


Рис. 11. Чувствительный элемент расходомера постоянного перепада:
1 — поток, 2 — диафрагма, 3 — поплавок, 4 — магнит, 5 — магнитная муфта

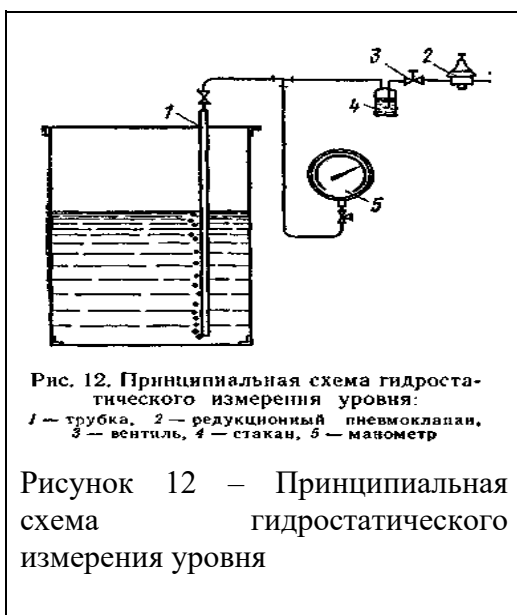
Рисунок 11 — Чувствительный элемент расходомера постоянного перепада

значения, при котором сила, вызванная увеличением перепада давления на поплавке, снова не уравновесится его массой. Перемещение поплавка 3 передается на стрелку показывающего прибора через шток 1, магнит 4 и магнитную муфту 5.

Приборы для измерения уровня

Для измерения уровня жидкости с постоянной плотностью применяют гидростатические, поплавковые и буйковые уровнемеры.

Принцип действия гидростатических уровнемеров основан на измерении давления внутри жидкости, определяемого массой столба жидкости, расположенного между точкой измерения и поверхностью жидкости в емкости.



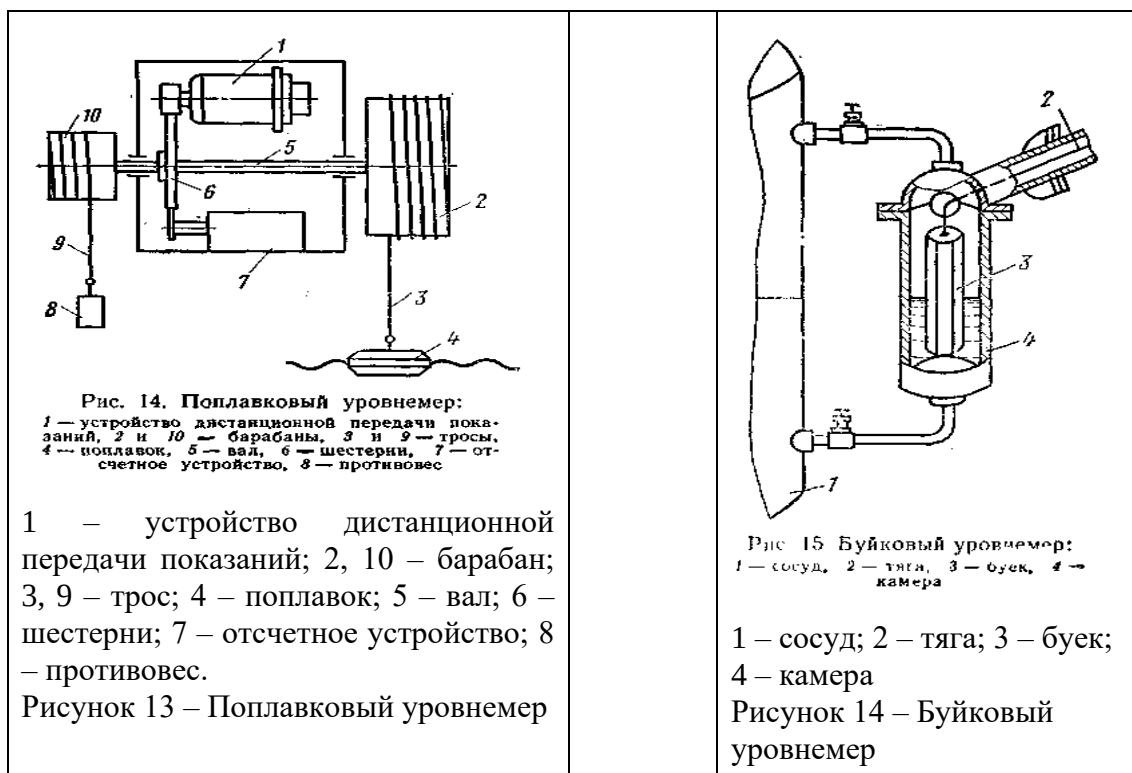
Если емкость открыта и жидкость, уровень которой измеряют, неагрессивна, то в качестве измерительного прибора применяют манометры (при высоте емкости не ниже 4 м) или напорометры (при высоте емкости менее 4 м), устанавливаемые вблизи дна резервуара. Давление, показываемое прибором, при постоянной плотности жидкости будет пропорционально уровню жидкости.

Для измерения уровня агрессивных жидкостей, контакт которых с чувствительным элементом недопустим, отделяют чувствительный элемент прибора от агрессивной жидкости потоком сжатого воздуха или газа, который подают в соединительную линию.

В этом случае чувствительный элемент манометра не будет контактировать с жидкостью, уровень которой измеряют. Гидростатический уровнемер, построенный по такому принципу, представляет собой трубку 1 (рисунок 12), в которую от редукционного пневмоклапана 2 через вентиль 3 и стакан 4 подают сжатый воздух. При небольшом расходе воздуха, который регулируют вентилем по числу пузырьков воздуха в стакане 4 за единицу времени, давление, измеренное манометром 5, будет равно гидростатическому давлению столба жидкости между концом трубки и поверхностью жидкости. При постоянной плотности жидкости показания манометра будут пропорциональны уровню жидкости.

Уровень в емкости, которая находится под давлением измеряют дифманометром. Перепад давлений равен гидростатическому давлению жидкости.

Поплавковые уровнемеры (рисунок 13) используют для измерения уровня по месту и дистанционной передачи показаний. Пустотелый поплавок 4 связан тросом 3 с барабаном 2. Трос 3 в один слой наматывают на барабан, длина окружности которого равна целой или дольной единице длины, например метру. Через вал 5 и шестерню 6 вращение барабана передается на устройство 1 дистанционной передачи показаний и на местное отсчетное устройство 7, которое фиксирует число оборотов барабана. Система приводится в действие противовесом 8.



Буйковые уровнемеры применяют для точного измерения уровня жидкости в сосудах, находящихся под давлением. Они бывают камерные и бескамерные. В камерных уровнемерах (рисунок 14) камера 4 патрубками с запорными вентилями подсоединяется к сосуду 1. Так как камера 4 и сосуд 1 сообщаются, уровень жидкости в них будет одинаковым. В камере на тяге 2 подвешен буюк 3. По закону Архимеда при погружении буйка в жидкость на него действует выталкивающая сила, равная массе жидкости, вытесненной погруженной частью буйка. При отсутствии жидкости в камере на тягу 2 будет передаваться максимальное усилие, при заполнении камеры и полном погружении поплавка — минимальное. Передаваемое усилие преобразуется в пропорциональное перемещение стрелки или изменение сигнала дистанционной передачи на выходе передающего преобразователя. Диапазон измерения уровня определяется длиной поплавка и высотой установки камеры на емкости.

В бескамерных уровнемерах поплавков помещен непосредственно в сосуд, в котором измеряют уровень.

Вибрационный датчик предельного уровня для жидкостей

Применяются практически для любых жидкостей, даже в условиях турбулентности, в случае присутствия твердых взвешенных частиц или газовых пузырьков, пенообразования, внешней вибрации, независимо от физических и электропроводных свойств жидкости. Основные выполняемые функции - определение максимального и минимального уровня жидкости в емкости, защита от перелива, предохранение работы насосов при откачке и контроль наличия жидкости в трубопроводе.

Конструктивно датчик выполнен в форме камертона (вилки), одна из половин которого служит источником колебаний, генерируемых пьезокристаллом, а вторая - приемником на резонансной частоте.

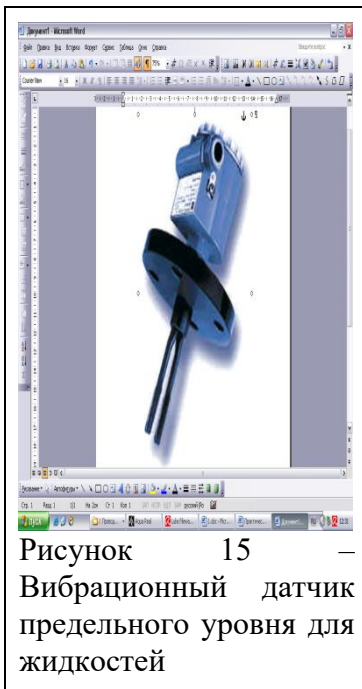


Рисунок 15 – Вибрационный датчик предельного уровня для жидкостей

Принцип работы основан на срабатывании датчика в момент изменения частоты колебаний от источника в результате изменения свойств среды, в которой распространяется сигнал (появление жидкости между пластинами). Сигнал, генерируемый в момент срабатывания, преобразуется в управляющий сигнал.

Прибор может обеспечивать высокую точность срабатывания (в пределах $\pm 1\text{ мм}$) независимо от типа жидкости и типа емкости. Благодаря специально разработанной улучшенной электронике датчик не чувствителен к внешней вибрации, имеет функцию самодиагностики (степень коррозии, отключение датчика, обрыв сигнального кабеля), также имеет иммунитет против налипания продукта на рабочей поверхности или изменения размеров в результате коррозионных потерь материала, а также в результате воздействия ударной нагрузки, приводящей к деформации. Прибор может быть смонтирован на верхней или боковой поверхности емкости.

Предел измерения от -40 до $+150^\circ\text{C}$, при давлении среды от -1 до $+40$ Бар.

Анализаторы свойств жидкостей и газов

Психрометры применяют для автоматического измерения влажности газов. Два термометра, один из которых обернут влажной материей, будут иметь разные показания. Это явление объясняется тем, что при испарении влаги затрачивается энергия, и температура влажного предмета становится ниже. Кроме того, испарение идет тем интенсивнее, чем ниже влажность окружающей среды (больше ее влагопоглощающая способность). Следовательно, разница в показаниях сухого и мокрого термометров будет тем больше, чем ниже влажность в измеряемой точке.

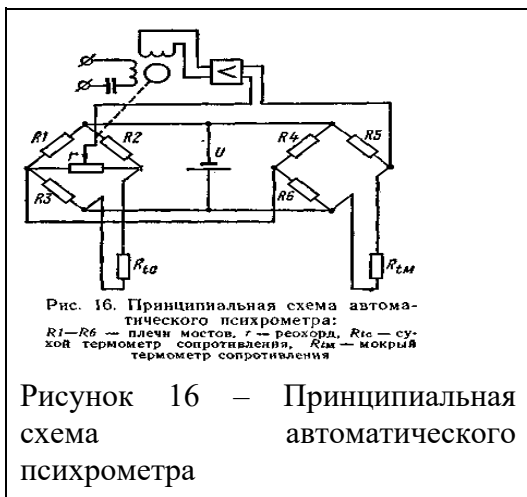


Рисунок 16 – Принципиальная схема автоматического психрометра

Упрощенная схема психрометра (рисунок 15) представляет собой два моста. В одно из плечей каждого моста включены термометры сопротивления R_{tc} и R_{tm} . Чехол термометра R_{tm} обернут матерчатым фитилем, конец которого погружен в сосуд с водой. При изменении влажности окружающего газа изменится соотношение сопротивлений термометров R_{tc} и R_{tm} и на вход усилителя поступит напряжение.

Буйковый плотномер. Принцип действия основан на законе Архимеда. Конструкция чувствительных элементов таких плотномеров аналогична

конструкции буйковых уровнемеров, боек которых полностью погружен в жидкость (затоплен). В этом случае на тягу со стороны буйка будет действовать сила F , равная

$$F = G_{\text{п}} - F_{\text{с}} = G_{\text{п}} - V_{\text{п}} \gamma_{\text{ж}},$$

где $G_{\text{п}}$ — масса поплавка;

F_v – выталкивающая сила;

V_n – объем поплавка;

$\gamma_{ж}$ – плотность жидкости.

Измеряя изменение силы F , измеряют пропорциональное изменение плотности жидкости.

Концентратомер. Принцип действия основан на измерении электропроводности растворов. Концентратомер представляет собой мост (рисунок 16, а), плечи которого постоянные сопротивления R_1, R_2 , а R_x и R_z – измерительная и эталонная электродные системы, остальные сопротивления служат для настройки схемы.

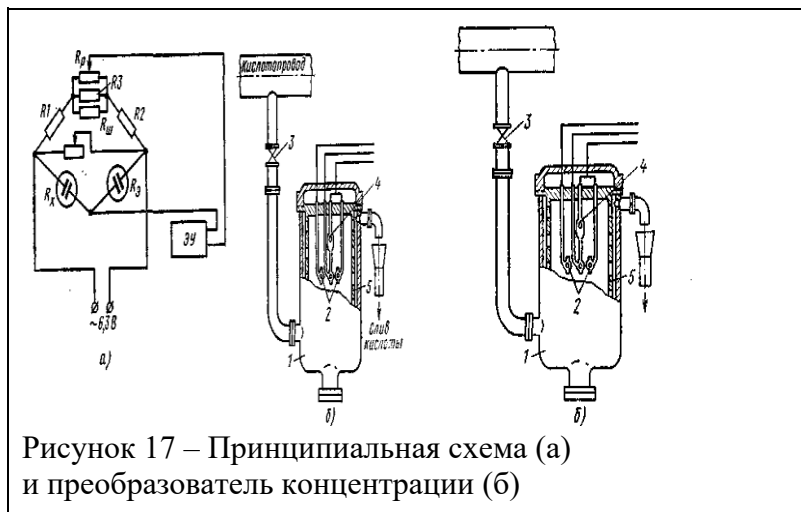


Рисунок 17 – Принципиальная схема (а) и преобразователь концентрации (б)

Измерительная система R_x представляет собой два электрода, погружаемые в измерительный раствор. При колебаниях концентрации электропроводность раствора меняется и электронный усилитель ЭУ уравнивает мостовую схему. Электропроводность растворов зависит от температуры. Чтобы уменьшить температурную погрешность измерения концентрации, эталонную

электродную систему R_z , которая помещена в эталонный сосуд с раствором известной концентрации, равной обычно верхнему или нижнему пределу измерений, погружают вместе с измерительными электродами в измеряемую среду.

В корпус 1 (рисунок 16, б) преобразователя для измерения концентрации помещен стакан 5 с отверстиями, в верхнюю стенку которого вмонтированы два измерительных электрода 2 и эталонный сосуд 4. Расход продукта через преобразователь регулируют вентилем 3.

Ротационный вискозиметр (рисунок 17) представляет собой ведущий 2 и измерительный 1 диски. Между дисками находится слой жидкости, вязкость которой измеряют. Диск 2 приводится во вращение электродвигателем 3. Скорость вращения диска 2 поддерживают постоянной. Через слой жидкости диску 1 передается крутящий момент, пропорциональный вязкости жидкости, под действием которого он будет поворачиваться на некоторый угол. Равновесие системы наступит тогда, когда крутящий момент будет уравновешен усилием пружины 4. Укрепленная на подвеске стрелка перемещается по шкале пропорционально вязкости жидкости.

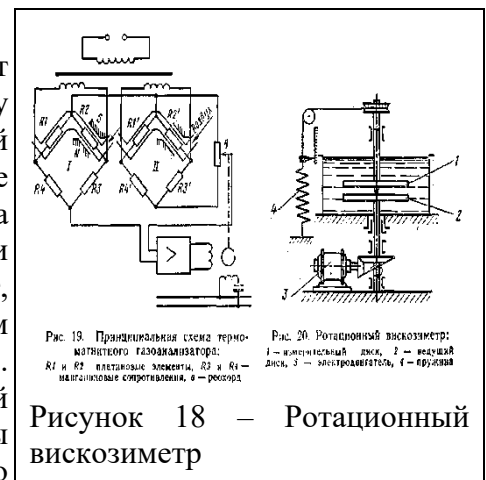


Рисунок 18 – Ротационный вискозиметр

Лабораторная работа № 2. Изучение принципа действия и проверка датчика расхода.

ТЕХНИКА ИЗМЕРЕНИЯ РАСХОДА

Расходомеры переменного перепада давления.

Принцип действия. Уравнения измерений

Принцип действия расходомеров данного типа, объединенных единым методом измерений, основан на измерении перепада давления, образующегося в результате местного изменения скорости потока жидкости, газа или пара. *

Метод переменного перепада давления один из наиболее старых и изученных методов измерения расхода. Это, а также возможность косвенной градуировки и поверки стандартизованных первичных преобразователей — сужающих устройств, реализующих метод, их простота и надежность, серийный выпуск вторичных преобразователей — дифманометров обусловило его чрезвычайно широкое (преимущественное по сравнению с другими) использование в практике промышленных измерений расхода. И вместе с тем в основе этого чисто гидродинамического метода лежат столь сложные физические процессы деформации потоков, столь большое число неконтролируемых факторов влияет на характер этих процессов, что применение его в настоящее время ограничено областями, где требуется относительно низкая точность измерений, хотя возможности его „метрологического совершенствования” далеко не исчерпаны.

Рассмотрим идеальную физическую картину явлений, лежащих в основе метода измерения расхода по перепаду давления на сужающем устройстве.

На рис. 55 показана форма потока несжимаемой жидкости, протекающей через диафрагму. Выделим в трубопроводе два сечения: I—I — перед сужающим устройством там, где поток еще не меняет своей конфигурации, и II—II — в месте наибольшего сжатия потока, находящемся на некотором расстоянии от внешнего (по ходу потока) торца диафрагмы.

Обозначим F — площадь поперечного сечения трубопровода, m^2 ; F_0 — площадь отверстия диафрагмы, m^2 ; $m = F_0/F$ — относительная площадь сужающего устройства; F_1 — площадь сечения потока в месте его наибольшего сжатия, m^2 .

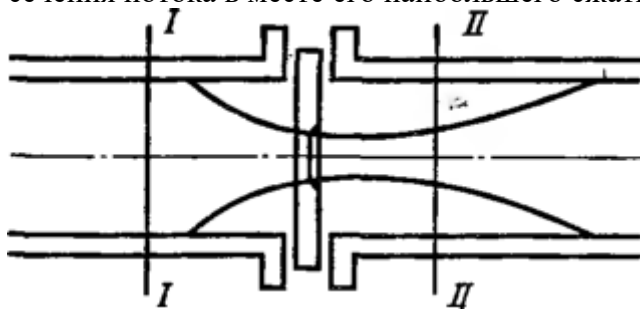


Рис. 1. Форма потока жидкости, протекающей через диафрагму

Для сечений I—I и II—II горизонтального установившегося потока несжимаемой жидкости плотностью ρ уравнение Бернулли будет иметь вид

$$\rho v_{ср2}^2 + p_2 = \rho v_{ср1}^2 + p_1, \quad (7-1)$$

а уравнение неразрывности

$$F v_{ср1} = F_1 v_{ср2} \quad (7-2)$$

где $\eta = F_1/F_0$ — коэффициент сжатия потока, зависящий от вида сужающего устройства; $v_{ср1}$ и $v_{ср2}$ — средние скорости потока в сечениях I—I и II—II соответственно; p_1 и p_2 — абсолютные давления в сечениях

I—I и II—II соответственно.

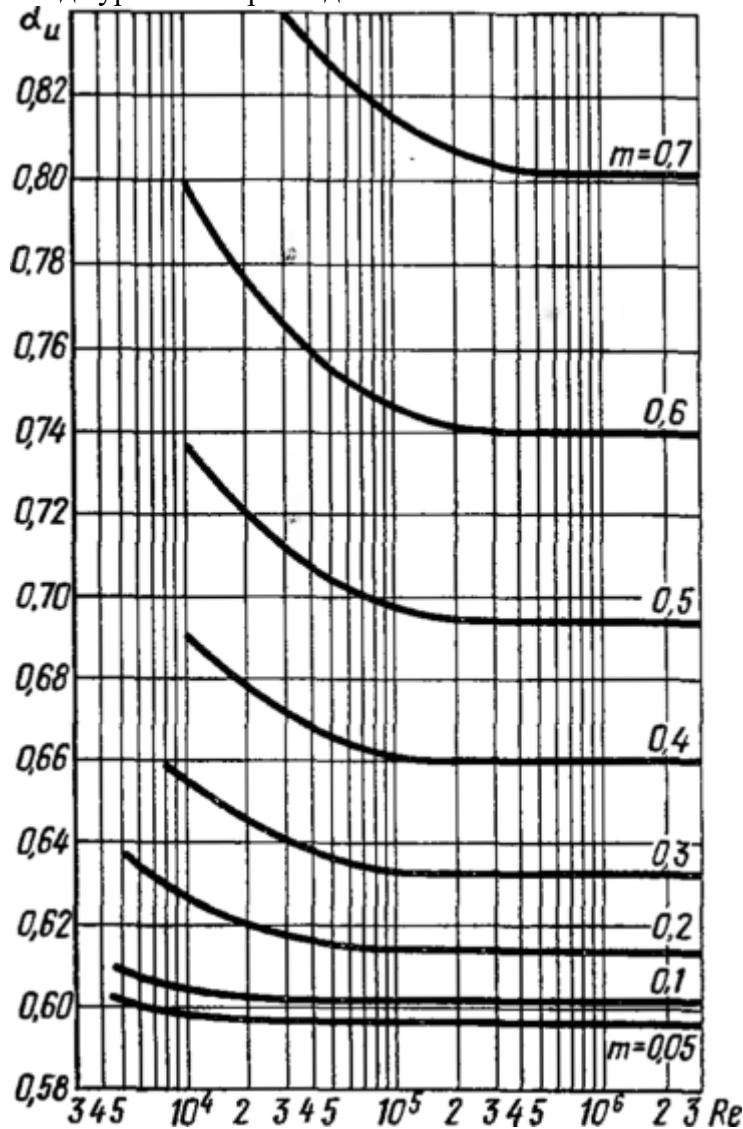
Решая совместно уравнения (7.1) и (7.2), получим выражение для средней скорости потока в сечении II—II

$$v_1 = \frac{1}{\eta} \sqrt{\frac{2(p_1 - p_2)}{\rho}}$$

При течении реальных измеряемых сред возникают дополнительные (не учтенные в приведенных выше формулах) физические явления, например, потери давления на вязкостное трение, вихревые сопротивления, неравномерное распределение скоростей, изменение плотности и т. п.

Учитывая эти обстоятельства, а также несовпадение мест реального отбора давлений с базовыми сечениями $I—I$ и $II—II$ (обычно перепад давления измеряется в углах, образованных стенками трубы с торцами диафрагмы), для получения уточненных общих уравнений расхода правые части формул (7.5) и (7.6) умножают на скоростной коэффициент α , характеризующий распределение скоростей по сечению выходящего из сужающего устройства потока, и коэффициент ϵ , учитывающий изменение плотности потока газа или пара при течении через сужающее устройство.

Тогда уравнения расхода



приобретают вид $Q = \alpha \epsilon F_0 \sqrt{\Delta p / \rho}$

где α —

Рис. 2. Графики изменения исходных коэффициентов расхода нормальных диафрагм

(P1-P2); (7.7)

$$M = \alpha \epsilon \sqrt{\Delta p (\rho_i - \rho)} \quad (7.8) \text{ м}^3/\text{с}$$

$$V_1 - (d')^2 m^2$$

Эти уравнения являются общими для всех расходомеров переменного перепада давления и пригодными для сжимаемой и несжимаемой сред. Для несжимаемой среды $e = 1$.

Коэффициент a , входящий в уравнения (7.7) и (7.8), называется коэффициентом расхода. Этот коэффициент зависит от относительной площади m сужающего устройства. С его помощью учитывают сложные гидродинамические явления, происходящие в потоке при изменении его конфигурации.

Не принимая во внимание действие сил тяжести на поток (при течении измеряемой среды по трубе с дозвуковыми скоростями такая идеализация допустима), на основании соображений, приведенных в предыдущей главе, можно утверждать, что явления, происходящие в установившемся, слабо пульсирующем и невращающемся потоке, однозначно определяются критерием подобия Рейнольдса. А если это так, то и коэффициент a , учитывающий эти явления, функционально зависит от числа Рейнольдса. На рис. 2 показаны графики изменения исходных (для условий установившегося, не пульсирующего и не вращающегося потока, при отсутствии близко расположенных местных сопротивлений) коэффициентов расхода нормальных диафрагм для различных значений m в зависимости от чисел Рейнольдса.

Как видно из рисунка, коэффициенты расхода остаются постоянными для одних и тех же m при Re , больших некоторых предельных значений Re^* , т. е. там поток приобретает автомодельный характер. Наличие автомодельной области ($Re > Re_{пр}$) позволяет градуировать сужающие устройства, для которых составлены таблицы значений a косвенным расчетным методом.

Естественно, если условия, при которых определены a , изменяются в процессе эксплуатации расходомера с сужающим устройством (например, если появляются существенные пульсации или вращательное движение потока, нет достаточных длин прямых участков перед расходомером), то исходные коэффициенты расхода необходимо корректировать, вводя соответствующие поправки или внося коррективы на точность измерений расхода.

Как следует из уравнений, расход (Q или M) и перепад давления ($P_1 - P_2$) функционально связаны квадратичной параболической зависимостью. Отсутствие линейной пропорциональности между объектом измерения ($P_1 - P_2$) и измеряемым параметром (Q или M) является основным методическим недостатком расходомеров переменного перепада давления.

Из приведенных выше методических предпосылок следует, что для измерения расхода жидкостей, газов и паров по перепаду давления необходимы три устройства, объединенные общим понятием расходомер переменного перепада:

устройство, создающее перепад давления в потоке измеряемой среды за счет местного изменения скорости потока или по значению (сужающие устройства), или по направлению (изогнутые участки трубы);

измерительный прибор — дифманометр, измеряющий перепад давления;

соединительное устройство, передающее перепад давления от потока к дифманометру.

Иногда к ним добавляются еще вторичный преобразователь, преобразующий показания дифманометра в электрический, пневматический или частотный сигнал, и вторичный прибор для регистрации этого сигнала.

Стандартные типы сужающих устройств. В настоящее время наиболее распространены стандартные сужающие устройства трех типов: нормальная диафрагма, нормальное сопло и труба (сопло) Вентури.

Нормальная диафрагма. При угловом отборе давления применяют нормальные диафрагмы двух видов — плоские (рис. 57) и камерные (рис. 58).

Нормальная диафрагма представляет собой тонкий диск с отверстием, concentричным оси трубы, с острой прямоугольной кромкой со стороны входа потока.

I

Рис. 3 Плоская диафрагма

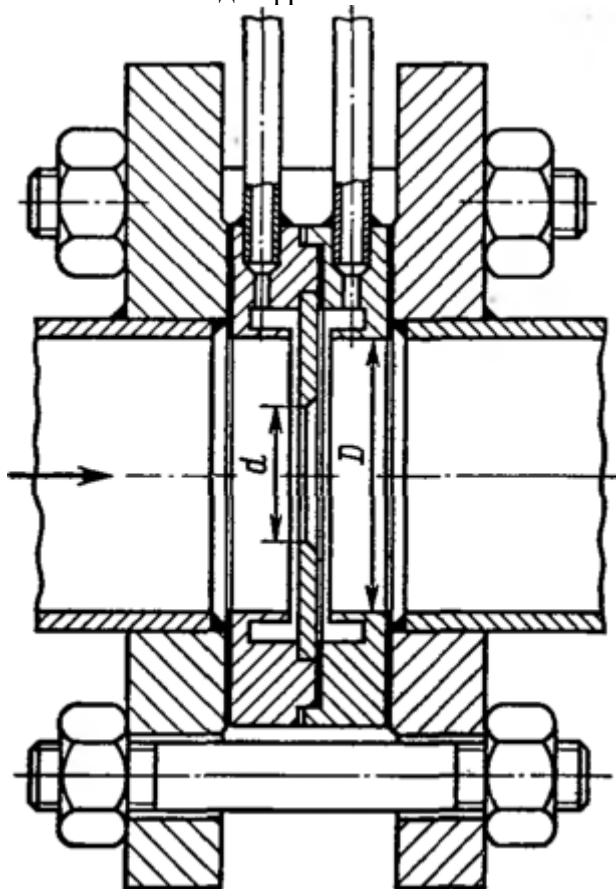


Рис. 3. Камерная диафрагма

Соосность установки, диафрагмы, острота входной кромки, формирующей определенный характер течения измеряемой среды через отверстие диафрагмы, ее прямоугольность и технологический допуск на входной диаметр диафрагмы d определяют возможность и точность косвенной (расчетной) градуировки расходомеров переменного перепада с нормальными диафрагмами. Поэтому к этим параметрам диафрагмы предъявляют весьма высокие требования. Так, допустимое отклонение оси отверстия диафрагмы от оси трубы не должно превышать $0,015 D (D/d - 1)$, где D — диаметр трубопровода.

Диаметр отверстия диафрагмы d не должен отличаться от расчетного более чем на $\pm (0,001—0,05) \%$ при $m < 0,45$ и на $\pm (0,005—0,05) \%$ при $m > 0,45$. Этим обеспечивается геометрическое подобие диафрагм.

Закругление, смятие или затупление входной кромки диафрагмы не допустимы, что обеспечивает идентичность характера течения измеряемых сред через однотипные диафрагмы.

Давления у плоской диафрагмы отбирают с помощью отдельных сверлений. Для усреднения давлений просверливают несколько отверстий, равномерно распределенных по окружности трубы в плоскостях отбора давлений. Выходящие из отверстий трубки объединяются двумя сборными коллекторами, от которых давления передаются к дифманометру.

Давления у камерных диафрагм отбирают из камер, соединенных с трубой кольцевыми щелями.

Преимуществом камерных диафрагм является отбор действительных средних давлений и в связи с этим несколько менее жесткие требования к длине прямолинейных участков трубопровода до и после диафрагмы; недостатком — необходимость специальных уплотнительных устройств для герметизации камер.

Нормальное сопло. Нормальное сопло (рис. 59) выполняют в виде насадка, имеющего входную сходящуюся часть, образованную дугами окружностей с радиусами r_1 и r_2 , равными $0,2d$ и $d/3$ и цилиндрическую часть диаметром d и длиной $0,3c$.

Выходная кромка сопла, как и у диафрагмы, должна быть острой, без закруглений и заусенцев. Она предохранена на выходе нишей.

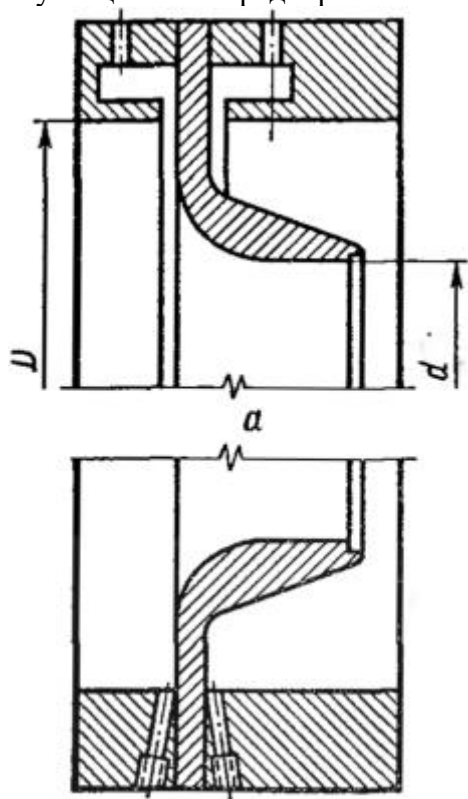


Рис. 4. Нормальное сопло

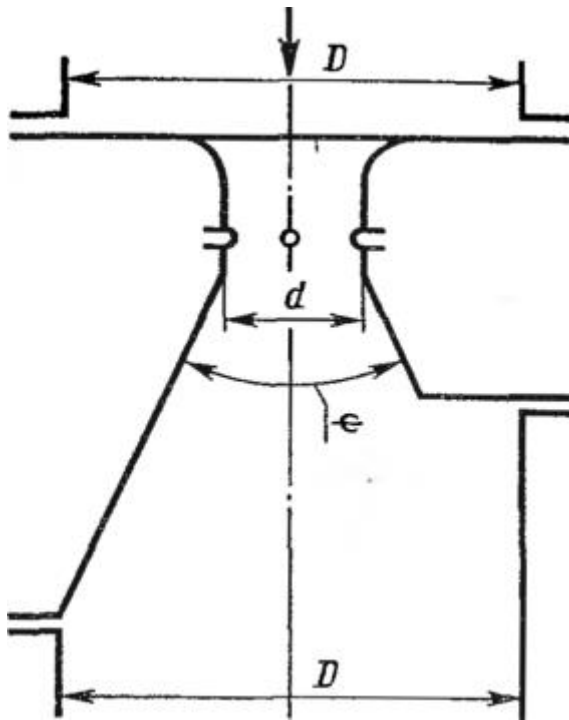


Рис. 5. Нормальная труба Вентури

Давления также можно отбирать или при помощи камер и кольцевых щелей или через отдельные отверстия.

Нормальная труба (сопло) Вентури. Существуют нормализованные расходомерные трубы Вентури четырех конструктивных разновидностей: трубы Вентури с сопловым и коническим входами, с длинным и коротким диффузорами.

На рис. 60 изображена труба Вентури с сопловым входом (сопло Вентури) с длинным (снизу) и коротким (сверху) диффузорами.

Входная часть трубы до места отбора минусового (меньшего) давления имеет тот же профиль, что и нормальное сопло. Длина цилиндрической части составляет обычно $(0,5—0,7) d$. Угол входного конуса диффузора должен быть менее 30° .

Плюсовое (большее) давление отбирают как с помощью кольцевой камеры, так и с помощью отдельных сверлений; минусовое — с помощью отдельных сверлений.

Наличие стандартных сужающих устройств трех типов объясняется относительными эксплуатационными преимуществами и недостатками каждого из них. Так, диафрагмы технологически просты и в области $Re < 0,3$ имеют меньшие предельные числа Рейнольдса (Re^*), чем сопла и трубы Вентури. Кроме того, коэффициенты расхода диафрагм менее подвержены влиянию искажения профиля скоростей и пульсаций потока. В то же время потери давления в соплах и трубах Вентури (особенно в последних) значительно меньше, чем у диафрагм. Кроме того, точность измерения расхода газов и пара с помощью сопел в области диаметров трубопроводов, меньших 300 мм, выше, чем при использовании диафрагм (в связи с большим постоянством коэффициента сжимаемости ϵ при применении сопел). Надежность сопел и труб Вентури, связанная с изменениями коэффициента расхода α при износе или загрязнении входного профиля сужающего устройства, значительно выше, чем у диафрагм.

Метрологические характеристики и область применения расходомеров переменного перепада давления. Измерения расхода по переменному перепаду давления, создаваемому сужающими устройствами, относятся к косвенным.

Рабочей формулой измерений расходомеров данного типа в самом общем виде является

$$Q = k \alpha_n k_{ш} k_o k_{Re} \epsilon d^2 k_t \sqrt{\frac{\Delta p}{\rho}},$$

где k — числовой коэффициент; — исходный коэффициент расхода, значения которого для нормализованных сужающих устройств приводятся в соответствующих таблицах (например, в таблицах РД 50—213—80); $k_{ш}$ — поправочный множитель на шероховатость трубопровода; k_{ξ} — поправочный множитель на остроту кромки у диафрагм; k_e — поправочный множитель на вязкость измеряемой среды, который вводится в случае, если число Рейнольдса в трубопроводе несколько меньше предельного числа Рейнольдса для данного типа и относительной площади сужающего устройства; k_t — поправочный множитель на расширение сужающего устройства.

На основании формулы (7.9) по закону сложения средних квадратических погрешностей относительная средняя квадратическая погрешность измерения расхода Q_q при соблюдении условий нормальной эксплуатации (при осесимметричном потоке с нормальной эпюрой скоростей и при отсутствии существенных пульсационных и вращательных составляющих скоростей)

$$Q_q = \sqrt{\sigma_{\alpha_n}^2 + \sigma_{k_{ш}}^2 + \sigma_{k_0}^2 + \sigma_{k_{Re}}^2 + \sigma_{\epsilon}^2 + \sigma_{k_t}^2 + \frac{1}{4} \sigma_{\Delta p}^2 + \frac{1}{4} \sigma_{\rho}^2}. \quad (7.10)$$

Средняя квадратическая погрешность табличного значения исходного коэффициента расхода (экспериментальная погрешность при его определении) зависит от относительной площади сужающего устройства. Значения этой погрешности для различных типов сужающих устройств колеблются в пределах от 0,2 до 0,7 %. я

Значения средних квадратических погрешностей σ_{α_n} , $\sigma_{k_{Re}}$ соответствующих поправочных множителей (погрешности их экспериментальной оценки) зависят от типа сужающего устройства, его относительной площади, диаметра трубопровода, чисел Рейнольдса и колеблются от 0 (при наиболее благоприятных условиях) до 1,5 %.

Напомним, что предельные значения погрешностей определения коэффициента сжатия ϵ составляют 4(1—5)% для диафрагм и 2(1 — S') % для сопел и труб Вентури.

Как правило, закон распределения действительных значений погрешностей определения ϵ в пределах указанных допусков для однотипных сужающих устройств неизвестен и в этом случае, приняв его равновероятным, найдем $\sigma_{\epsilon} = 2,3(1-S)$ % для диафрагм и $\sigma_{\epsilon}' = 1,2(1-S)$ % для сопел и труб Вентури.

Следовательно, максимальные значения средней квадратической погрешности определения ϵ (при $S = 0$) соответствуют $\sigma_{\epsilon_{\max}} = 2,3$ % для диафрагм, $\sigma_{\epsilon_{\max}} = 1,2$ % для сопел и труб Вентури, а минимальные (при $S = 0,75$) $\sigma_{\epsilon_{\min}} = 0,58$ % и $\sigma_{\epsilon'_{\min}} = 0,3$ % соответственно.

Далее, является средней квадратической погрешностью определения диаметра отверстия сужающего устройства.

В соответствии с принятыми нормами максимальная допускаемая погрешность измерения диаметра сужающего устройства равна $\pm 0,1$ % от d .

Тогда, приняв, как и в предыдущем случае, равновероятное распределение погрешностей в пределах допуска, получим $\sigma_d = 0,06$ %.

Средняя квадратическая погрешность определения коэффициента расширения сужающего устройства α_k обычно мала по сравнению с другими составляющими (даже при $T = 723$ К $\sigma_{\alpha_k} = 0,02$ %), поэтому, как правило, ею можно пренебречь. Среднюю квадратическую погрешность измерения перепада давления определяют по формуле

$$\sigma_{\Delta p} = \frac{1}{\alpha_k} \sigma_{\Delta p_{\text{тПЯУ}}}$$

Одп---zz, °кл»

$$\sigma_{\Delta p} = \frac{1}{\alpha_k} \sigma_{\Delta p_{\text{тПЯУ}}}$$

где $\Delta p_{\text{ср}}$ — среднее расчетное значение перепада давления, обычно принимаемое равным $4/9 (\Delta p)_{\text{тах}}$; — максимальная приведенная погрешность дифманометра, определяемая его классом точности.

Формула также получена для условий равновероятного распределения погрешностей в пределах допуска для однотипной совокупности дифманометров.

Для обычных эксплуатационных дифманометров при соблюдении требований к их установке и обслуживанию 5

кл 1*0 % и для диф

манометров со вторичными приборами $5^{\wedge} = 2,0—2,5$ %. Следовательно, Одр колеблется в пределах от 1,3 до 3,2 %.

Средняя квадратическая погрешность a_p характеризуется погрешностью расчетного значения плотности, взятого из соответствующих справочных данных, изменением параметров, влияющих на плотность измеряемой среды, если отсутствуют корректирующие устройства, и неточностью корректировочных поправок, если имеются корректирующие устройства. Для нормальных условий применения сужающих устройств $O_p = 0,1—1,0$ %. Нижнее значение (0,1 %) соответствует измерению чистых однофазных жидкостей, верхнее (1,0 %) — измерению расхода газов при незначительных колебаниях температуры и давления. При наличии устройств автоматической коррекции показаний дифманометров данная погрешность также будет лежать в пределах указанных граничных значений (несколько уменьшится лишь верхняя граница).

Определим теперь возможные пределы изменения суммарной средней квадратической погрешности измерения расхода с помощью расходомеров переменного перепада давления.

В лучшем случае — при измерении расхода жидкостей ($e = 1$) и при отсутствии необходимости введения поправок на вязкость, шероховатость и острота кромки

$$O_q = y/0,25^2 + 4 \cdot 0,06^2 + 1/4 \cdot 1,30^2 + 1/4 \cdot 0,10^2 = 0,75 \%$$

В наиболее неблагоприятных случаях (с учетом наибольших погрешностей всех поправочных коэффициентов) средняя квадратическая погрешность измерения расхода может достигать 3,0—4 %.

Таким образом, максимальная погрешность измерения расхода (при доверительной вероятности 0,95) с помощью расходомеров переменного перепада давления при нормальных условиях эксплуатации колеблется в пределах от 1,5 до 8 %.

- Указанные пределы максимальных погрешностей измерений характерны для косвенных (расчетных) методов градуировки и поверки расходомеров с нормализованными типами сужающих устройств. При индивидуальной аттестации расходомеров совместно с подводящими участками трубопроводов и применении дифманометров повышенной точности основная погрешность этих расходомеров может быть снижена до 0,5—1 %.

Для нормальной работы сужающих устройств необходимы достаточно длинные прямые участки трубопровода, так как любые местные сопротивления (колена, угольники, конические вставки, вентили, задвижки и т. п.), вызывая искажение эпюры скоростей по сечению потока, его закручивание и дополнительные пульсации, приводят к отклонению действительных значений коэффициентов расхода от табличных (исходных)

и, как следствие, к появлению дополнительных неконтролируемых в процессе измерений погрешностей.

Наименьшие необходимые длины прямых участков h перед (по ходу потока) сужающим устройством при отборе давлений через кольцевые камеры приведены на рис. 61 и 62. Если же давления отбирают через отдельные отверстия, то длина прямых участков должна быть увеличена вдвое по сравнению с длинами, указанными на этих рисунках.

Для местных сопротивлений, создающих винтовое движение потока, необходимая длина прямого участка может быть уменьшена за счет установки в трубопроводе перед сужающим устройством (на расстоянии не

! f

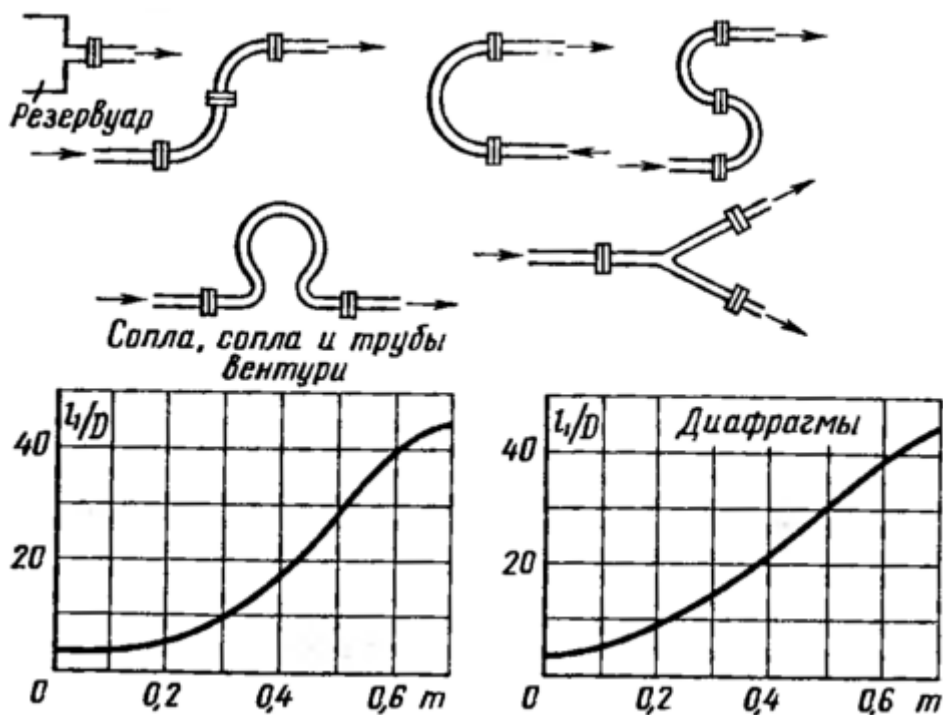


Рис. 6. Наименьшие допустимые длины прямых участков трубопровода от местных сопротивлений указанных видов до сужающего устройства Γ''

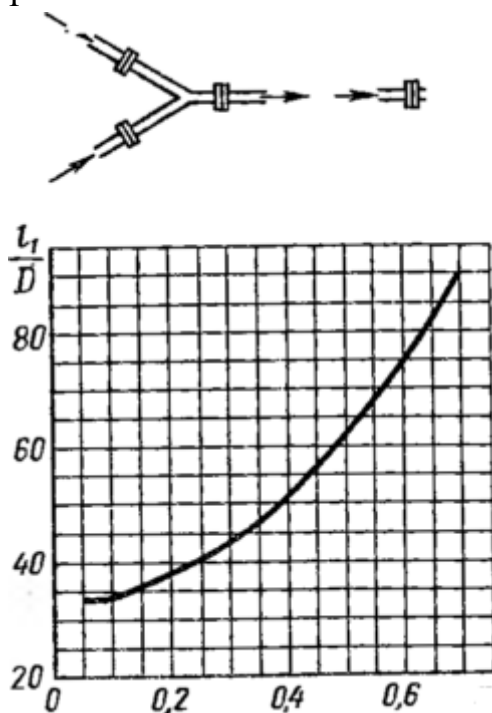


Рис. 7. Наименьшие допустимые длины прямых участков трубопровода от местных сопротивлений, создающих винтообразное движение потока, до сужающего устройства (менее $2D$ от него) специальных струевыпрямителей, представляющих собой либо мелкоячеистые сетки, либо набор трубок, перекрывающих все сечения трубопровода. При этом следует иметь в виду, что струенаправляющие аппараты вызывают дополнительные (и немалые) потери напора в трубопроводе и требуют тщательного ухода в связи с возможностью засорения и износа.

Минимально допустимая длина прямого участка $/2$ за сужающим устройством зависит от его относительной площади и равна 40 для $m = 0,05$ и $8D$ для $m = 0,7$.

Существующие нормализованные сужающие устройства с унифицированными табличными значениями исходных коэффициентов расхода применимы лишь для диаметров трубопровода больших 50 мм. Расходомеры переменного перепада на меньшие диаметры требуют индивидуальной градуировки, и в этом случае пропадает возможность их косвенной расчетной аттестации по унифицированным табличным данным. Кроме того, существенно возрастают погрешности, связанные с шероховатостью трубопровода, так как уменьшение диаметра ведет к увеличению относительной шероховатости. Поэтому расходомеры следует градуировать комплектно с эксплуатационными участками трубопровода.

Унифицированные табличные значения α , и формулы для расчета ϵ пригодны при измерении расхода однофазных (чистых) сред и квазистационарных потоков. И хотя в практике сужающие устройства нередко используют для измерения расхода двухфазных сред и измерения пульсирующих расходов (см. разд. 7.14) погрешности показаний расходомеров при этом (без их индивидуальной градуировки непосредственно на месте эксплуатации) невозможно пронормировать и оценить.

Измерение расходов с помощью нормализованных сужающих устройств в области малых чисел Рейнольдса (при малых диаметрах трубопроводов, вязких жидкостях, значительно нагретых газах и других) практически невозможно из-за непостоянства коэффициентов расхода (при $Re < Re^*$), а следовательно, и из-за невозможности нормирования и оценки реальной точности этих измерений. В практике для измерений расхода при малых числах Рейнольдса применяются некоторые модифицированные типы сужающих устройств, например, сопло с профилем „четверть круга”, двойная диафрагма, сегментная диафрагма, сопло с профилем „полукруг” и т. п. Предельные числа Рейнольдса у этих сужающих устройств получаются несколько меньшими, чем у нормальных. Однако данные устройства требуют индивидуальной градуировки, как правило, непосредственно на месте эксплуатации, их погрешности в настоящее время не нормированы и применяют их в основном в качестве индикаторов.

Таким образом, область нормального (с определенными и нормированными погрешностями измерений) применения расходомеров переменного перепада давления ограничена измерением стационарных расходов однофазных жидкостей, сухого перегретого пара и сухих газов на трубопроводах диаметром более 50 мм с определенной длиной прямого участка, при значительных числах Рейнольдса ($Re > Re^*$) и в тех случаях, когда допустимо изменение конфигурации потока.

Несмотря на эти ограничения и относительно малую точность, расходомеры переменного перепада получили преимущественное распространение в отечественной расходоизмерительной практике. По-существу, они являются единственным типом стандартизованных расходоизмерительных устройств.

Они не требуют индивидуальной градуировки и аттестации, обладают унифицированными и взаимозаменяемыми элементами, применимы при значительных давлениях и температуре измеряемых сред. В случае необходимости изменения предела измерения в расходомере достаточно сменить сужающее устройство (изменить относительную площадь m), наиболее же сложная и дорогостоящая часть прибора — дифманометр — остается неизменной. Для этого следует лишь изменить предел измерения дифманометра или сменить его шкалу.

Простота и надежность сужающих устройств, определяемая при правильной эксплуатации достаточно медленными процессами износа, коррозии и „зарастания” их входного профиля, также способствовали широкому распространению расходомеров переменного перепада.

И наконец, метрологические возможности (возможности повышения точности) расходомеров этого типа на сегодняшний день далеко не исчерпаны. Как показали

проведенные в последние годы исследования, установка перед сужающими устройствами специально спрофилированных насадков (конфузоров и диффузоров), обеспечивающих равномерное (прямоугольное) распределение скоростей по сечению потока, правильно „спланированный” набор взаимокомпенсирующих возмущающих факторов (например, отсутствие необходимой длины прямого участка может частично компенсироваться „закруткой” потока и т. п.) в некоторых случаях могут существенно повысить точность расходомеров переменного перепада давления.

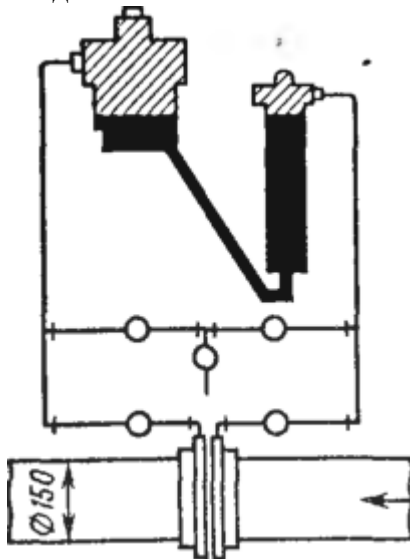
Установка и обслуживание расходомеров переменного перепада давления. Существенное влияние на правильность работы данных расходомеров оказывает взаимное расположение сужающего устройства и дифманометра, а также монтаж соединительных (импульсных) линий. Поэтому для нормальной работы расходомеров при их монтаже необходимо выполнить ряд общих и частных (для различных случаев измерений) требований.

Так, импульсные линии к сужающему устройству при измерении расхода жидкостей в горизонтальном трубопроводе присоединяют в нижней части поперечного сечения трубопровода (ниже его горизонтальной оси); при измерении расхода пара — на горизонтальном диаметре поперечного сечения трубопровода; при измерении расхода газа — в верхней части сечения трубопровода (выше его горизонтальной оси).

Дифманометр устанавливают по возможности ближе к сужающему устройству. Длина соединительных трубок при этом для достаточного сглаживания пульсаций давления должна быть не менее 3 м. Диаметр трубок выбирают из условий минимального динамического запаздывания показаний дифманометра, обычно он равен 10—12 мм. Соединительные трубки монтируют или вертикально, или с уклоном 1:20 до 1:10. Монтаж соединительных трубок должен обеспечить возможность их периодической очистки, для чего используют фланцевые или ниппельные соединения.

При измерении расхода жидкости или пара дифманометр целесообразнее устанавливать ниже сужающего устройства, чтобы предотвратить попадание в него пузырьков воздуха. Если же по каким-либо причинам дифманометр монтируют выше сужающего устройства, то в соединительных линиях устанавливают азосборники с кранами для выпуска воздуха. В соединительных линиях (в наиболее низко расположенных точках) устанавливают также сосуды с кранами для слива отстоявшейся грязи и взвешенных частиц.

При измерении расхода пара необходимо обеспечить одинаковый уровень конденсата в соединительных трубках. Для этого вблизи сужающего устройства устанавливают уравнительные сосуды на такой высоте, чтобы конденсат мог накапливаться в них лишь до определенного уровня, а превысив его, стекал бы обратно в трубопровод. Тем самым устраняют ошибку в показаниях дифманометра за счет разностей уровней конденсата в соединительных линиях.



При измерении расхода газа дифманометр следует располагать выше сужающего устройства для того, чтобы содержащаяся в газе влага не попадала в дифманометр. Если же его можно монтировать только ниже сужающего устройства, то в наиболее низко расположенных точках соединительных линий устанавливают дренажные устройства. Качественное техническое и метрологическое состояние расходомеров обеспечивается комплексом мероприятий по их обслуживанию, регламентируемым соответствующими нормативными документами, инструкциями и правилами.

Расходомеры постоянного перепада давления

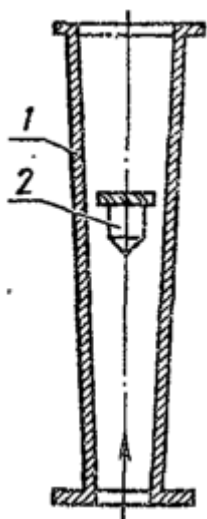
Общая характеристика расходомеров постоянного перепада давления. Расходомеры данного типа довольно широко применяются в системах автоматического контроля и регулирования в химической и топливной промышленности из-за конструктивной простоты; высокой чувствительности и вследствие этого возможности применения для измерения весьма малых расходов; возможности применения для измерения расхода агрессивных жидкостей и газов; простоты автоматизации измерений; постоянства относительной погрешности и вследствие этого значительного диапазона измерения $G_{\max}/G_{\min} = 10:1$ (для расходомеров переменного перепада он составляет 3:1); незначительных потерь давления.

Однако эти приборы имеют и существенные недостатки, препятствующие их массовому применению: отсутствие научных принципов взаимозаменяемости и косвенной расчетной градуировки; необходимость индивидуальной градуировки на реальных измеряемых средах и существенные потери точности при измерении других сред, отличных от тех, на которых осуществлялась градуировка; непригодность для измерения больших расходов.

В настоящее время разработано и предложено несколько способов пересчета результатов опытных градуировок расходомеров постоянного перепада давления, проводимых на воде или на воздухе, на реальные измеряемые среды. Однако ни один из них не является универсальным и достаточно достоверным. Подробнее некоторые из этих способов будут рассмотрены ниже.

Существуют расходомеры постоянного перепада давления трех конструктивных разновидностей: ротаметры, поршневые и поплавковые расходомеры. Принцип действия всех этих приборов основан на силовом взаимодействии потока и помещенного в него тела.

Ротаметры. Основными элементами ротаметра (рис. 64), принципиально необходимыми для его работы, являются расширяющаяся кверху (по ходу вертикального потока) коническая трубка 1 и заключенный в нее поплавок 2. Для визуального отсчета показаний применяют стеклянную трубку, непосредственно на которую нанесены деления шкалы прибора.



Поплавок состоит из нижней конической и средней цилиндрической части, заканчивающейся бортиком с косыми канавками. Назначение канавок — обеспечить устойчивое вращение поплавка при течении измеряемой среды, что необходимо для его центрирования относительно оси трубки.

При использовании ротаметров в системах автоматического регулирования или контроля необходимы допол-Рис. 64. Ротаметры, преобразующие ход поплавка в пропорциональный механический, электрический или пневматический сигналы.

Принцип действия ротаметров состоит в следующем. Гидродинамическое давление потока измеряемой среды воздействует на поплавок и вызывает его вертикальное перемещение. При этом (в связи с конусностью трубки) изменяется площадь проходного сечения прибора, образованного диаметром буртика поплавка и внутренней стенкой трубки.

Это изменение площади происходит таким образом, что перепад давления по обе стороны поплавка остается практически постоянным (отсюда и название расходомеров).

Поплавок будет подниматься до тех пор, пока его вес и вес связанных с ним элементов не уравнивается уменьшающееся (вследствие уменьшения скорости из-за увеличения проходного сечения) по мере подъема поплавка динамическое давление потока.

Следовательно, условие равновесия поплавка будет иметь вид

$$F_n(r_p - p) = c_p \rho v^2 / 2, \quad (7.11)$$

где F_n — объем поплавка; r_p — плотность материала поплавка; p — плотность измеряемой среды; c_p — коэффициент сопротивления поплавка, зависящий в общем случае от числа Рейнольдса, шероховатости, формы, геометрических размеров и высоты подъема поплавка; $/n$ — наибольшее поперечное (миделево) сечение поплавка; v — средняя скорость потока в кольцевом сечении, ограниченном с внутренней стороны $/n$ и с внешней площадью сечения трубки F_T , соответствующей подъему поплавка.

Так как расход для рассматриваемого случая $Q = v (F_T - /n)$, из уравнения (7.11) получим

$$Q = \frac{F_n (r_p - p)}{c_p \rho} \sqrt{2} \quad (7.12)$$

где $Ir = 1/\sqrt{c_p}$ — коэффициент расхода ротаметров, а в общем случае

коэффициент расхода расходомеров постоянного перепада давления.

Уравнение (7.12) является общим уравнением измерений для всех расходомеров постоянного перепада.

Как следует из вышеизложенного, коэффициент расхода c_p зависит от большого числа факторов и непостоянен по шкале прибора. Эти обстоятельства и приводят к ряду теоретических и практических трудностей при пересчетах результатов градуировки ротаметров на условия, отличные от условий градуировки.

⁴ Для конической трубки площадь F_T задается соотношением

$$Fr = f\{D_0 + 2Htg-f-f = -*(Y_0^2 + 4HD_0 tg-f + 4/\wedge tg^2 - | -), (7.13)$$

где D_0 — внутренний диаметр трубки на нулевом делении; H — высота подъема поплавка относительно нулевого деления; 5 — центральный угол конической трубки.

Если центральный угол S мал (обычно $5 = 35'$), то квадратическим членом в правой части формулы (7.13) можно пренебречь. В этом случае уравнение измерений для ротаметров (связь между ходом поплавка и расходом) на основе формул (7.12) и (7.13) будет иметь вид

Как видно из уравнения (7.14), при малых 5 между ходом поплавка и расходом существует приближенная линейная пропорциональность, что также является достоинством расходомеров постоянного перепада давления.

Основы пересчета градуировок ротаметров. Наиболее общим подходом к пересчету градуировок ротаметров является установление некоторых универсальных зависимостей, определяющих Or и ход поплавка для геометрически подобных ротаметров со стандартизованными формой и размерами их элементов — поплавка и трубки. При высоком уровне стандартизации, обеспечивающем полное геометрическое подобие и взаимозаменяемость элементов, и достаточной достоверности полученных зависимостей их можно было бы использовать для косвенной (расчетной) градуировки ротаметров (аналогично расчету сужающих устройств по стандартизованным значениям их коэффициентов расхода). При отсутствии обоснованных норм, обеспечивающих точное технологическое копирование элементов ротаметров, каждый ротаметр градуируют индивидуально. Причем, из-за отсутствия специальных установок градуировку, как правило, проводят на типовых контрольных веществах (при измерении расхода жидкостей — на воде, при измерении расхода газов на воздухе). Поэтому применение ротаметров как приборов с нормированной точностью для измерения расхода реальных сред, свойства которых отличны от свойств типовых контрольных веществ, требует создания достоверных способов пересчета градуировочных данных.

Рассмотрим один из наиболее общих способов пересчета, разработанный во ВНИИМС под руководством А.И. Петрова.

В процессе теоретических и экспериментальных исследований ротаметров было установлено, что ход поплавка D выраженный в долях диаметра поплавка d , зависит от двух безразмерных величин: числа Рейнольдса и величины $v^2\rho/G$, где v — кинематический коэффициент вязкости измеряемой среды; ρ — ее плотность и G — кажущийся (с учетом выталкивающей силы) вес поплавка. Между этими величинами существует зависимость вида

$$JL = fcRe^{n_1} (-\wedge f)^{n_2}, \quad (7.15)$$

а о

где коэффициент k и показатели степени n_1, n_2 — постоянные величины для геометрически подобных ротаметров с одинаковой формой поплавка и трубки.

Эти коэффициенты для каждого типа ротаметра могут быть экспериментально определены. В этом случае при помощи специальных таблиц или градуировочных кривых показания ротаметра H на одной измеряемой среде могут быть пересчитаны на любую другую измеряемую среду (с другой вязкостью и плотностью). Естественно, это требует строгой взаимозаменяемости и геометрического подобия трубок и поплавков ротаметров, а также большой экспериментальной работы по определению опытных коэффициентов. Такие работы в настоящее время проводятся в метрологических институтах Госстандарта СССР.

Кроме того, в ряде отечественных и зарубежных расходомерных центрах ведутся экспериментальные исследования по нахождению такой формы поплавка (дисковой, тарельчатой, катушечной), при которой влияние вязкости и плотности измеряемой среды на показания ротаметров можно свести к минимуму.

Полученная на основе теории подобия зависимость (7.15) позволяет осуществить и достаточно простой „технологический” метод градуировки ротаметров ^закрывающийся

в изменении веса поплавка таким образом, чтобы значение критерия $v^2\rho/G$ оставалось постоянным, т. е. в случае необходимости измерения расхода жидкости или газа, вязкость и плотность которых отличаются от вязкости и плотности градуировочной среды, необходимо и достаточно лишь изготовить новый поплавок весом $G_2 = v_1/v_2 \cdot P_2/P_1 G_1$, где G_1 — вес поплавка ротаметра, градуированного на среде с вязкостью v_1 и плотностью ρ_1 .

Если форма и размеры нового поплавка полностью соответствуют старому, то новые значения шкалы прибора Q_2 (соответствующие тому же ходу поплавка) подсчитывают, исходя из равенства чисел Рейнольдса по формуле $Q_2 = Q_1 \cdot v_1/v_2$.

Этот метод очень простой, так как не требует построения экспериментальных пересчетных таблиц и графиков и пригоден для ротаметров любых размеров и любой формы поплавка.

К недостаткам метода можно отнести сложность точного технологического копирования поплавков и невозможность существенного варьирования их веса в случае, когда вязкости v_2 и v_1 значительно отличаются друг от друга.

Одним из перспективных путей расширения областей применения ротаметров для измерений расхода различных сред с гарантированной точностью является создание условий автомодельности их коэффициентов расхода «р, т. е. условий, при которых Ir принимает постоянное значение и перестает зависеть от изменений вязкости и плотности измеряемых сред.

Как показали исследования, автомодельность Ir для ротаметров с поплавками, имеющими в верхней части тонкий цилиндрический диск, наступает при числах Рейнольдса, характерных для течения среды в зазоре между трубкой и поплавком, больших 500.

Таким образом, если и при градуировке, и при работе ротаметра на реальной измеряемой среде обеспечивается соотношение

$$G_{min}/D_{min} \approx G_0/D_0$$

где G_{min} — нижний предел измерений ротаметра; D_m — диаметр трубки на отметке шкалы ротаметра, соответствующей O_{min} . то на основании выражения (7.14) реальная функция преобразования ротаметра (градуировочная характеристика на реальной измеряемой среде) будет отличаться от его исходной градуировочной характеристики $H = AQ$ — B постоянным множителем

$$1 - 5 - y/P^2 - 1 \quad \text{У РП/Р, - 1 '}$$

$$B = \frac{G_{min}}{D_{min}^2}$$

$$1 - \frac{G_{min}}{D_{min}^2} \cdot \frac{D_{max}^2}{G_{max}}$$

D

Это значит, что каждое новое (пересчитанное) показание ротаметра Y_{p1} соответствующее расходу Q_2 , будет $Y_{p1} = bH_{T1}$ где Y_{p1} — показание ротаметра, соответствующее расходу Q^* в условиях градуировки.

Сам метод прост, но для его осуществления необходим выбор таких конструктивных параметров поплавка, которые в достаточно широком диапазоне изменения вязкости обеспечат соотношение (7.16).

Рассмотренные примеры показывают, что и те, кто сейчас еще только осваивает по этому учебнику азы расходомерии, будут иметь широкие возможности для творческих поисков повышения точности даже таких, казалось бы, простейших и хорошо изученных средств измерения расхода, как ротаметры.

Поршневые и поплавковые расходомеры. Поршневые расходомеры применяются для измерения расхода воды, нефтепродуктов, вязких и агрессивных жидкостей. Устройство поршневого расходомера показано на рис. 65. В корпусе прибора 1 запрессована цилиндрическая бронзовая втулка 2, имеющая круглое входное отверстие и прямоугольное выходное. Внутри втулки под действием динамического давления потока измеряемой среды перемещается поршень 3 с грузами 8, открывая или перекрывая

выходное отверстие. Положение поршня, являющееся мерой расхода вещества, передается с помощью штока 7 и фиксируется индукционной системой 4, 5, 6.

Конструктивно корпус, втулка и поршень выполняются таким образом, что в крайнем нижнем положении поршня выходное отверстие остается полностью открытым, а входное полностью закрытым.

Предел измерений прибора регулируется изменением ширины выходного отверстия.

Если у измеряемого вещества высокая температура, крышка прибора снабжается ребристым охладителем, если низкая температура и большая вязкость, то крышка обогревается паром или горячей водой.

Поршневой расходомер следует устанавливать на горизонтальном участке трубопровода длиной не менее $10Z$ до прибора и не менее $8D$ после прибора. В случае измерения расхода загрязненных жидкостей перед прибором монтируют фильтр.

Принцип действия поплавковых расходомеров аналогичен принципу действия ротаметров и поршневых расходомеров. В данном случае динамическое давление потока измеряемой среды воздействует на поплавок, занимающий в зависимости от величины расхода определенное положение относительно седла, находящегося в корпусе вентильного типа.

Основные недостатки ротаметров (необходимость индивидуальной градуировки и существенное влияние свойств измеряемых сред на точность измерений) сохраняются и у этих расходомеров.

Метрологические характеристики и область применения расходомеров постоянного перепада давления. В настоящее время нормируются погрешности лишь тех расходомеров постоянного перепада, которые были индивидуально градуированы на реальной измеряемой среде. В этом случае при постоянных (и не отличающихся от условий градуировки) усло-

Рис. 8. Поплавковый расходомер:

1 — поплавок; 2 — измерительное сопло;

3 — шток; 4 — диск, предохраняющий механизм от нагрева; 5 — втулка с уплотнительной набивкой; 6 — диафрагма для записи показаний; 7 — счетный указатель; 8 — уравнивающий груз; 9 — поршень для обеспечения плавного движения поплавка

При измерениях погрешность приборов будет определяться погрешностями их градуировки ($\delta_{гр}$), отсчета показаний (δ_n) и нелинейности шкалы ($\delta_{нел}$).
Существующие установки для градуировки промышленных ротаметров позволяют градуировать их с погрешностью, не превосходящей 0,2—0,3 %. Следовательно, среднее квадратическое значение погрешности градуировки (при равномерном ее распределении в пределах допусков) может оцениваться величиной $\sigma^2 = \sigma_{гр}^2 / 3 = 0,18 \%$.

Среднее квадратическое значение погрешности δ_n определяется ошибкой отсчета, равной половине деления шкалы (при визуальном отсчете, например, у стеклянных ротаметров), и у применяемых приборов данного типа достигает 1,5–2,0 % (при $Q = Q_{max}$).

Погрешность вследствие нелинейности шкалы $\delta_{нел}$ связана, в основном, с непостоянством коэффициента расхода $\sigma_{тр}$ при изменении положения поплавка и связанных с этим изменений структуры потока. Обычно среднее квадратическое значение этой погрешности $\delta_{нел}$ по аналогии с сужающими устройствами принимают равным 0,5—0,6 %.

Как следует из схемы соединительных линий в случае измеряется расход газа. Поэтому при диаметре трубопровода, меньшем 300 мм, целесообразнее применять нормальное сопло.

Просуммировав все составляющие, получим наибольшую по шкале (при $Q = Q_{max}$) относительную среднюю квадратическую погрешность расходомеров постоянного перепада давления

$\delta_{\Sigma} = \sqrt{\delta_{гр}^2 + \delta_n^2 + \delta_{нел}^2} = 1,6 \text{ — } 2,2\%$.

Максимальная (с доверительной вероятностью $P = 0,9973$) приведенная к верхнему пределу измерений расхода погрешность данного типа расходомеров составит $\delta_{ц,} = 3/10 \cdot a_p = 0,5 — 0,7 \%$.

При колебаниях плотности измеряемой среды, характеризующихся средним квадратическим значением a_p , к рассмотренным выше составляющим добавляется дополнительная погрешность вследствие колебаний плотности среды, равная на основании формулы

$$\frac{\Delta \rho}{\rho} = \pm \frac{\sqrt{3} \cdot \sigma_p}{\rho} \approx \pm \frac{\sigma_p}{\rho}$$

Таким образом, при индивидуальной градуировке, проведенной на реальной измеряемой среде, расходомеры постоянного перепада давления могут применяться как приборы с нормированной точностью для измерения расхода жидкостей, газов или пара. При этом, в случае измерения однофазных чистых-сред с незначительными изменениями их вязкости и плотности точность измерения расхода данными приборами выше, чем точность измерения расходомерами переменного перепада давления. Нормальные (не влияющие на точность) условия их эксплуатации определяются лишь наличием достаточно длинных вертикальных (для ротаметров) или горизонтальных (для поршневых и поплавковых расходомеров) участков трубопровода.

Без индивидуальной градуировки или при градуировке на средах, отличных от измеряемой, расходомеры постоянного перепада в настоящее время (до разработки и внедрения правил пересчета результатов градуировок) можно применять лишь как устройства индикаторного типа, качественно характеризующие изменения расхода (больше — меньше, есть расход — нет расхода). Устройства такого типа используют в системах автоматического регулирования и контроля за ходом различных технологических процессов в химической, газовой, топливной промышленности и др. Простота, хорошие динамические характеристики (постоянная времени 0,5—1 с), устойчивость к агрессивным средам — эти свойства ротаметров способствовали их наибольшему распространению в упомянутых системах.

В настоящее время серийно выпускают ротаметры показывающие со стеклянной трубкой типа РС, ротаметры с электрической дистанционной передачей типа РЭ и ротаметры с пневматической дистанционной передачей типа РП.

Турбинные расходомеры

Общие характеристики. Турбинные (или как их часто называют тахометрические) расходомеры являются наиболее точными приборами для измерения расхода жидкостей. Приведенная погрешность измерения расхода турборасходомерами составляет значение порядка 0,5—1,0 % (известны турборасходомеры с приведенной погрешностью 0,1—0,2 %).

Приборы просты по конструкции, имеют большую чувствительность и большие пределы измерений (для одной модификации 10:1 и более), возможность измерения как малых (от $5 \cdot 10^{-9} \text{ м}^3/\text{с}$), так и достаточно больших (до $1 \text{ м}^3/\text{с}$) расходов жидкостей с широким диапазоном фи-зико-химических свойств, малую инерционность и вследствие этого относительно малые динамические погрешности при измерении средних и мгновенных значений расходов. Их, в основном, применяют там, где требования к точности измерений преобладают, например, в ракетной и авиационной технике.

К недостаткам турбинных расходомеров существующих модификаций, препятствующим более широкому применению данных приборов, можно отнести: необходимость индивидуальной градуировки и вследствие этого необходимость наличия градуировочных установок высокой точности; влияние изменения вязкости измеряемой среды и гидродинамических параметров потока на показания приборов; наличие изнашивающихся опор, что резко сокращает срок службы приборов (особенно при измерении расхода абразивных сред), снижает их точность в процессе эксплуатации и приводит к

необходимости их частых переградуировок (уточнения значений меняющихся в процессе эксплуатации градуировочных коэффициентов).

В настоящее время отечественным приборостроением разработаны и осваиваются безопорные турбинные расходомеры, турбинные расходомеры с устройствами автоматической коррекции показаний при изменении вязкости измеряемой среды, у которых два последних недостатка отсутствуют.

Принцип действия. Уравнение измерений. Для осуществления процесса измерений турбинный расходомер (рис. 8) должен состоять, по крайней мере, из трех элементов ; турбинного первичного преобразователя вторичного преобразователя 4\ отсчетной системы (регистратора) 1. Турбинный преобразователь представляет собой аксиальную или тангенциальную лопастную турбинку (на рис. 67 показана аксиальная турбинка), опирающуюся на крестовые подпятники или подшипники 2.

Поток измеряемой среды, воздействуя на наклонные лопасти турбинки, сообщает ей вращательное движение с угловой скоростью ω , пропорциональной расходу Q .

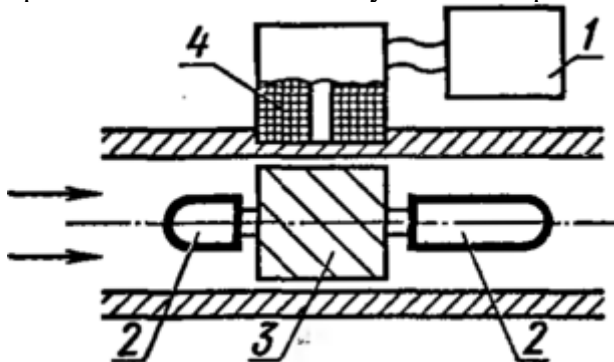


Рис. 8. Принципиальная схема турбинного расходомера

Вторичный преобразователь, изображенный на схеме, представляет собой индукционную катушку. При пересечении магнитного поля катушки лопастями ферромагнитной турбинки в катушке наводится пикообразный пульсирующий ток. Частота пульсаций наведенного тока пропорциональна угловой скорости вращения турбинки, а следовательно, и измеряемому расходу. В качестве вторичных преобразователей используются также индуктивные катушки, в которых при вращении ферромагнитной турбинки создается периодическое изменение индуктивности, вызывающее соответствующие изменения одного из параметров текущего через нее тока. Применяются также и фотоэлектрические элементы.

Импульсы пульсирующего тока регистрируются отсчетной системой. Общее число импульсов, зарегистрированных этой системой за время t , характеризует суммарное количество вещества, протекающее по трубопроводу за это время. Число импульсов, зарегистрированных (отсчитанных) системой за единицу времени, характеризует расход измеряемого вещества.

Уравнение равномерного вращения лопастной турбинки имеет вид

$M_m = ZM_{ci}$, где $M_{да}$ — движущий момент на роторе турбинки, сообщаемый ей потоком измеряемой среды; $2 M_{ci}$ — сумма моментов сопротивления.

На основе известного уравнения Эйлера (на котором базируются все расчеты турбинных двигателей) для осевого входа потока движущий момент

$M_{\omega} = a\rho Q^2 - b\rho Q \omega$, где a и b — коэффициенты, определяемые конструктивными параметрами турбинного датчика (радиусом лопастей R , радиусом ступицы турбинки r , углом наклона лопастей α) и зависящие от числа Рейнольдса в области неавтомодельного потока.

Если предположить, что на турбинный датчик не действует никаких моментов, препятствующих его вращению, т. е. что $2 M_{ci} = 0$, то на основании формулы (7.18)

зависимость мену угловой скоростью вращения датчика ω и расходом Q определялась бы уравнением

$$\omega = A Q, \quad \text{где } A = a/B.$$

В действительности же на турбинку действуют моменты сил гидравлического трения жидкости, момент сил трения в опорах и ряд других. Действие этих моментов будет характеризоваться так называемой зоной нечувствительности прибора, т. е. тем наименьшим расходом (Q_0), который необходим для того, чтобы преодолеть моменты сопротивления и сдвинуть турбинку с места или изменить ее установившуюся скорость вращения.

С учетом сказанного из формулы получим рабочее уравнение турбинных расходомеров $g_j = A(Q - Q_0)$. Так как коэффициент A и величина Q_0 определяются в процессе непосредственной градуировки, то уравнение, решенное относительно Q , называют иногда градуировочной зависимостью турбинных расходомеров.

Как следует из этого уравнения, область постоянной линейной зависимости угловой скорости вращения турбинки от расхода определяется зоной постоянства коэффициента A и величины Q_0 , которые в общем случае кроме конструктивных параметров прибора зависят также от числа Рейнольдса, структуры потока (его искажений и „закрутки”), расхода и вязкости измеряемой среды.

Значение Q_0 при правильном проектировании и изготовлении турбинных датчиков (малый коэффициент трения в опорах, отсутствие перекосов, хорошая балансировка турбинки, защищенность от осевых нагрузок) может быть сведено к ничтожно малому, что и обеспечивает высокую чувствительность и большой диапазон измерений турбинных расходомеров.

Основными эксплуатационными факторами, существенно влияющими на точность измерения расхода турбинными расходомерами, являются: изменение вязкости измеряемой среды; закрутка потока и неравномерность распределения скоростей, вызванные наличием близко расположенных местных сопротивлений и износ опор.

Вследствие этого данные приборы мало пригодны для измерения расхода загрязненных или абразивных сред, а также жидкостей, сильно меняющих свою вязкость, в условиях эксплуатации приборов.

Если не принять соответствующих мер для частичной или полной компенсации влияния указанных факторов, то дополнительные погрешности, например, вследствие изменения кинематического коэффициента вязкости измеряемой среды всего лишь на 10 % могут достигать 3 % и более, а из-за близкой установки 90-градусного колена трубопровода — 2-5 %.

Для снижения влияния вязкости применяют различного рода устройства (сетки, спицы, конфузоры), устанавливаемые перед турбинкой и искусственно турбулизирующие поток.

Влияние местных сопротивлений, закручивающих поток, в значительной мере устраняется, если перед турбинным датчиком установлены специальные направляющие или сопловые аппараты. В этом случае для нормальной работы, турбинных датчиков не требуется столь длинных прямых участков трубопровода, как для других типов расходомеров.

Для измерения расхода газов сравнительно редко применяют турбинные расходомеры. Это объясняется тем, что движущий момент на роторе турбинки в газовых потоках вследствие их малой плотности получается значительно меньшим, чем в жидкостных, в результате чего уменьшается чувствительность прибора и диапазон измерений. Кроме того, большие скорости газовых потоков ускоряют износ опор.

Турбинные расходомеры обладают достаточно хорошими динамическими характеристиками (постоянной времени 0,001 с), поэтому их можно применять для измерения мгновенных значений расхода в пульсирующих потоках.

К тахометрическим расходомерам, кроме турбинных, относятся и шариковые расходомеры, получившие достаточно широкое распространение для измерения расхода агрессивных сред и сред, содержащих абразивные включения, т. е. там, где трудно обеспечить надежную работу опор турбинных датчиков. .

Подвижным элементом шариковых расходомеров является шарик, непрерывно движущийся в одной плоскости по внутренней поверхности трубы под воздействием предварительно закрученного винтовым направляющим аппаратом потока жидкости. От перемещения вдоль оси трубы шарик удерживается ограничительным кольцом. Неподвижные лопасти служат для „выпрямления” потока на выходе из преобразователя. Для преобразования скорости вращения шарика в частоту импульсов тока служит индукционное или индуктивное устройство. Шар под действием центробежной силы прижимается к внутренней поверхности трубы, а под действием осевой составляющей скорости потока — к ограничительному кольцу. Поэтому шару помимо сил вязкостного трения жидкости приходится преодолевать силы трения о поверхность трубы и ограничительного кольца. Это вызывает отставание окружной скорости шара v_m от соответствующей окружной скорости потока v . Это отставание характеризуется скольжением $S_{СК}$, равным $S_{СК} = (v - v_m)/v$. Откуда, $v_m = v(1 - S_{СК})$. Как следует из этого соотношения, пропорциональность между угловой скоростью вращения шара и скоростью потока измеряемой среды обеспечивается при постоянстве скольжения $S_{СК}$, которое зависит, в основном, от лобового сопротивления шара. Следовательно, шариковые расходомеры целесообразно использовать там, где коэффициент лобового сопротивления шара C остается (в приемлемых пределах) постоянным, т. е. в автомодельной для C по числу Рейнольдса зоне, которая обычно принимается равной $10^3 < Re < 10^5$.

7.4. Электромагнитные расходомеры

Принцип действия. Уравнение измерения. В проводнике, пересекающем силовые линии магнитного поля, индуцируется ЭДС, пропорциональная скорости движения проводника. При этом направление тока, возникающего в проводнике, перпендикулярно к направлению движения проводника и направлению магнитного поля.

Это известный закон электромагнитной индукции — закон Фарадея.

Если заменить проводник потоком проводящей жидкости, текущей между полюсами магнита, и измерять ЭДС, наведенную в жидкости по закону Фарадея, можно получить принципиальную схему электромагнитного расходомера (рис. 9), предложенную еще самим Фарадеем.

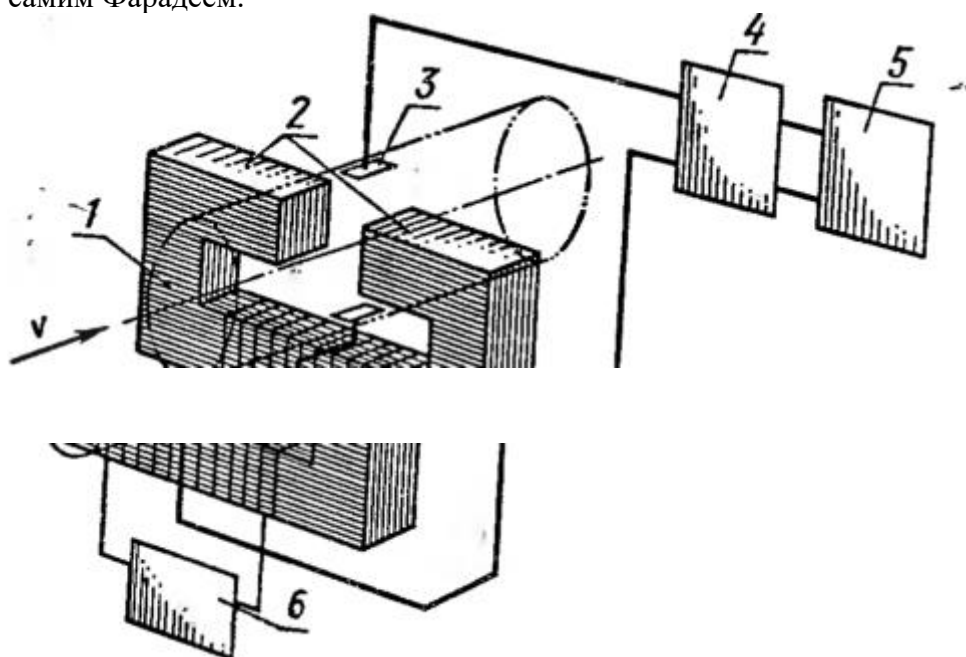


Рис. 9. Принципиальная схема электромагнитного расходомера:

1 — трубопровод; 2 — полюса магнита;
3 — электроды для съема ЭДС; 4 — электронный усилитель; 5 — отсчетная система; 6 — источник питания магнита

Индукцируемую разность потенциалов E на электродах 3 определяют по уравнению электромагнитной индукции

$E = -KBDv$, где B — магнитная индукция в зазоре между полюсами магнита; средняя скорость потока жидкости; D — внутренний диаметр трубопровода; K — коэффициент, зависящий от вида магнитного поля.

Для случая постоянного магнитного поля $K = 1$. Если же магнитное поле изменяется во времени t с частотой f , $\sin 2\pi f t$.

Магнитное поле создается источником питания 6 магнита. ЭДС, снимаемую с электродов, при помощи электронного усилителя 4, преобразуют в усиленный электрический сигнал, регистрируемый отсчетной системой 5.

Выражая в уравнении среднюю скорость потока через объемный расход измеряемой среды, получим уравнение измерений электромагнитных расходомеров:

для случая постоянного магнитного поля

$$E = -A \cdot \frac{d\Phi}{dt}$$

nD

для случая переменного магнитного поля

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

Метрологические характеристики и область применения электромагнитных расходомеров. Погрешность данных приборов определяется в основном погрешностями их градуировки (определения постоянной величины $C = AKBfuD$) и измерения разности потенциалов E . Однако электрохимические процессы в потоке жидкости, различные помехи и наводки, непостоянство напряжения питания и другие, не позволяют пока получить той потенциально высокой точности измерений расхода, которая вытекает из принципа действия данного типа расходомеров. Так, изготавливаемые в СССР электромагнитные расходомеры, несмотря на индивидуальную градуировку, (на высокоточных расходомерных стендах) и весьма совершенные средства измерения E имеют класс точности 1,0—2,5 %.

Существенным и основным недостатком электромагнитных расходомеров с постоянным электромагнитом, ограничивающим их применение для измерения слабопульсирующих потоков, является поляризация измерительных электродов, при которой изменяется сопротивление преобразователя, а следовательно, появляются существенные дополнительные погрешности. Поляризацию уменьшают, применяя электроды из специальных материалов (угольные, каломадиевые) или специальные покрытия для электродов (платиновые, танталовые).

В расходомерах с переменным магнитным полем явление поляризации электродов отсутствует, однако появляются другие эффекты, также искажающие полезный сигнал.

Во-первых, это трансформаторный эффект, когда на витке, образуемом жидкостью, находящейся в трубопроводе, электродами, соединительными проводами и вторичными приборами наводится трансформаторная ЭДС, источником которой является первичная обмотка системы возбуждения магнитного поля. Трансформаторные помехи могут достигать 20—30 % полезного сигнала. Для их компенсации в измерительную схему прибора вводят специальные дополнительные устройства.

Во-вторых, имеет место емкостный эффект, возникающий из-за большой разности потенциалов между системой возбуждения магнитного поля и электродами и паразитной емкости между ними (соединительные провода и т. п.). Средством борьбы с этим эффектом является тщательная экранировка.

В-третьих, может иметь место эффект влияния изменения частоты питающего систему возбуждения магнитного поля тока. Компенсируют этот эффект установкой специальных стабилизирующих устройств, что усложняет измерительные схемы и уменьшает надежность приборов.

Тем не менее электромагнитные расходомеры широко применяют в металлургической, биохимической и пищевой промышленности, в строительстве и руднообогатительном производстве, в медицине, так как они малоинерционны по сравнению с расходомерами других типов. Расходо-

меры незаменимы в тех процессах автоматического регулирования, где запаздывание играет существенную роль, или при измерении "быстро меняющихся расходов."

Первичные преобразователи электромагнитных расходомеров не имеют частей, выступающих внутрь трубопровода (электроды устанавливаются заподлицо со стенкой трубопровода), сужений или изменений профиля. Благодаря этому гидравлические, потери на приборе минимальны. Кроме того, преобразователь расходомера и технологический трубопровод можно чистить и стерилизовать без демонтажа. Поэтому эти расходомеры используют в биохимической и пищевой промышленности, где доминирующими являются требования к стерильности измерений среды. Отсутствие полых углублений исключает застой и коагулирование измеряемого продукта.

На показания электромагнитных расходомеров не влияют взвешенные в жидкости частицы и пузырьки газа, осесимметричное (а в каналах специальной формы любое) измерение профиля распределения скоростей потока, а также физико-химические свойства измеряемой жидкости (вязкость, плотность, температура и т. п.), если они не изменяют ее электропроводность.

Электромагнитные расходомеры можно монтировать в любом положении на расстояниях, равных не менее 20 диаметров трубопровода после местных сопротивлений, нарушающих осесимметричное течение среды, и не менее восьми диаметров до местных сопротивлений.

Конструкция первичных преобразователей позволяет применять новейшие изоляционные, антикоррозионные и другие покрытия, что дает возможность измерять расход агрессивных и абразивных сред.

Отмеченные преимущества и 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 ($3 \cdot 10^{-9} \text{ м}^3/\text{с}$) расходов (например, для измерения расхода крови по кровеносным сосудам) и больших расходов жидкостей ($3 \text{ м}^3/\text{с}$). Причем диапазон измерения расходомера одного типоразмера достигает значения 10:1, т. е. достаточно велик.

Электромагнитные расходомеры непригодны для измерения расхода газов, а также жидкостей с электропроводностью менее 10^{-3} — 10^{-5} сим/м (10^{-5} — $10^{-7} \text{ Ом}^{-1}\cdot\text{см}^{-1}$), например, легких нефтепродуктов, спиртов и т. п. Применение разрабатываемых в настоящее время специальных автокомпенсирующих устройств позволит существенно снизить требования к электропроводности измеряемых сред и создать электромагнитные расходомеры для измерения расхода любых жидкостей, в том числе и нефтепродуктов.

7.5. Ультразвуковые расходомеры

Принципиальная схема ультразвукового расходомера приведена на рис. 69. Звуковые колебания высокой частоты (20 кГц и выше), создаваемые электроакустическим

вибратором (излучателем) $И1$, проходят через текущую по трубопроводу среду и регистрируются приемником

$П1$, отстоящим от излучателя на —————|—*тиииии* расстояние L . Если v — скорость V потока среды, а c — скорость

-----звука в данной среде, то про-

$Щ(П2) \sim \frac{1}{L - \frac{v}{c} L} = \frac{1}{1 - \frac{v}{c}}$ $П1(u2)$ Д^{олжительность} распространения

^-----' „ звуковой волны по направлению

движения потока от излучателя $И1$ до приемника $П1$

Рис. 69. Принципиальная схема ультразву-

кового расходомера $c + v$

Продолжительность же распространения звуковой волны против движения потока от излучателя $И2$ до приемника $П2$

$m_e = \frac{L}{c - v}$. (7.25)

$C - V$

Не трудно убедиться, что на основании формул (7.24) и (7.25) разность $m_e - T$, измеряемая электронно-счетной схемой,

$\Delta T = \frac{L}{c^2} \frac{v^2}{c}$. (7.26)

г

Приняв во внимание, что v^2/c^2 пренебрежимо мала по сравнению с единицей (например, для жидкостей, у которых $c = 1000—1500$ м/с, а v не превосходит $6—8$ м/с, $v^2/c^2 < 6 \cdot 10^{-5}$), и выразив скорость потока через расход, получим уравнение измерений ультразвуковых расходомеров

$\Delta T = 2 \frac{L}{c^2} \frac{v^2}{c} \sim \frac{2L}{c^2} \frac{Q^2}{F^2}$ (7.27)

где F - площадь сечения потока; $\frac{2L}{c^2}$ — коэффициент, учитывающий распределение скоростей по сечению потока.

Существуют различные способы и различные измерительные схемы для определения ΔT :

1) измерение разности фазовых сдвигов ультразвуковых волн, направляемых по потоку и против него;

2) измерение разности частот повторения коротких импульсов или пакетов ультразвуковых колебаний, направляемых одновременно по потоку и против него;

3) измерение разности длительности прохождения коротких импульсов, направляемых одновременно по потоку и против него.

Кроме того, имеется самостоятельный метод определения расхода, основанный на измерении смещения потоком ультразвуковой волны, направляемой перпендикулярно к направлению движения среды.

Основные трудности практического использования ультразвуковых расходомеров связаны с тем, что, во-первых, скорость распространения звука зависит от физико-химических свойств измеряемой среды (ее температуры, давления, концентрации и т. п.) и, во-вторых, она несоизмеримо больше скорости движения этой среды. Первое из отмеченных обстоятельств приводит к необходимости применения в ультразвуковых расходомерах специальных методов и средств компенсации влияний свойств среды, второй — к необходимости использования дифференциальных схем измерений (для выделения „слабого” полезного сигнала). И то, и другое обуславливает большую сложность измерительной аппаратуры.

Кроме того, показания ультразвуковых расходомеров зависят от числа Рейнольдса. Это объясняется тем, что они измеряют не действительную среднюю скорость потока, а среднюю скорость по линии ультразвукового луча. Соотношение между этими скоростями является функцией числа Рейнольдса.

Несмотря на это, ультразвуковые расходомеры все более широко применяют в нефтехимической, пищевой и других отраслях промышленности, при гидравлических исследованиях и испытаниях гидромашин. Достоинствами их являются:

возможность бесконтактного измерения любых сред, в том числе и неэлектропроводных;

достаточно высокая точность приборов при их индивидуальной градуировке и использовании специальных средств автокомпенсации наиболее существенных помех (известны ультразвуковые расходомеры, основная погрешность которых не превышает 0,3 % верхнего предела измерений) ;

высокая надежность чувствительных элементов (излучателей и приемников ультразвуковых колебаний), представляющих собой круглые пластинки кварца или титаната бария, устанавливаемые снаружи трубопровода или защищенные от непосредственного контакта с измеряемой средой металлическим (пластмассовым) звукопроводом;

высокое быстродействие, позволяющее измерять пульсирующие расходы с частотой пульсаций до 10 000 Гц.

Чувствительность ультразвуковых расходомеров зависит от отношения v/c . Чем больше это отношение, тем больше чувствительность прибора и тем меньше погрешности измерений. Из сказанного следует, что данные приборы более пригодны для измерения расхода газов, чем жидкостей, так как значение v/c у газов значительно больше. Однако в настоящее время ультразвуковые расходомеры преимущественно применяются для измерения расхода жидкостей. Это объясняется тем, что акустическое сопротивление (ρc) газов мало. Поэтому ультразвуковым колебаниям в газе трудно сообщить энергию, необходимую для переноса волны от излучателя до приемника, поскольку количество энергии, отбираемой средой от излучателя, пропорционально акустическому сопротивлению среды.

Кроме того, коэффициент поглощения звука для газов значительно больше, чем для жидкостей.

7.6. Оптические (лазерные) расходомеры

К числу сравнительно новых, но быстро развивающихся методов измерения локальных скоростей потока и расхода относятся методы, основанные на применении оптических квантовых генераторов—лазеров (ОКГ). Достоинствами этих методов являются: бесконтактность, высокая чувствительность, малая инерционность, большой диапазон измерений скоростей и расходов независимо от физических свойств измеряемой среды (как жидкостей, так и газов), за исключением требования ее прозрачности в диапазоне длин волн, излучаемых квантовыми генераторами.

Наиболее перспективно применение оптических методов в экспериментальной гидродинамике, особенно в области турбулентных явлений, изучение которых традиционными способами (например, с помощью термоанемометров) уже не дает желаемых результатов вследствие малой точности приборов и, главное, вносимых ими искажений в изучаемую структуру потока.

Кроме того, лазерные расходомеры используют при измерении расхода агрессивных, высоко- и низкотемпературных (криогенных) жидкостей и газов.

В настоящее время распространение получили две конструктивные разновидности оптических (лазерных) расходомеров, отличающихся лежащими в их основе физическими явлениями: расходомеры, основанные на эффекте рассеяния света движущимися частицами (доплеровские расходомеры), и расходомеры, основанные на эффекте Физо-Френеля — увлечения света движущейся средой.

В оптическом расходомере (назовем его сокращенно ДИС), реализующем первый эффект, излучение лазера, рассеянное движущимися в потоке естественными или искусственно введенными частицами, приобретает частотный сдвиг, пропорциональный осредненной скорости частиц.

Принципиальная схема ДИС показана на рис. 10. Прибор работает следующим образом. Световой поток, излучаемый газовым лазером 1, делится расщепителем 2 на два параллельных пучка равной интенсивности, которые линзой 3 фокусируются в исследуемой области среды, движущейся по трубопроводу 4. В области пересечения лучей возникает пространственная интерференционная картина из чередующихся светлых

и темных полос. Перемещающиеся в этой области частицы перекрывают светлые полосы, в результате чего рассеянный частицами свет модулируется частотой, пропорциональной скорости движения частиц.

Рассеянный свет улавливается приемной оптической системой 5 и направляется на фотодетектор 7. Выделение и регистрация, частотного сигнала (пропорционального скорости движения частиц) осуществляется анализатором спектра или автоматической следящей системой 8. Диафрагма 6 предохраняет фотодетектор от фонового излучения.

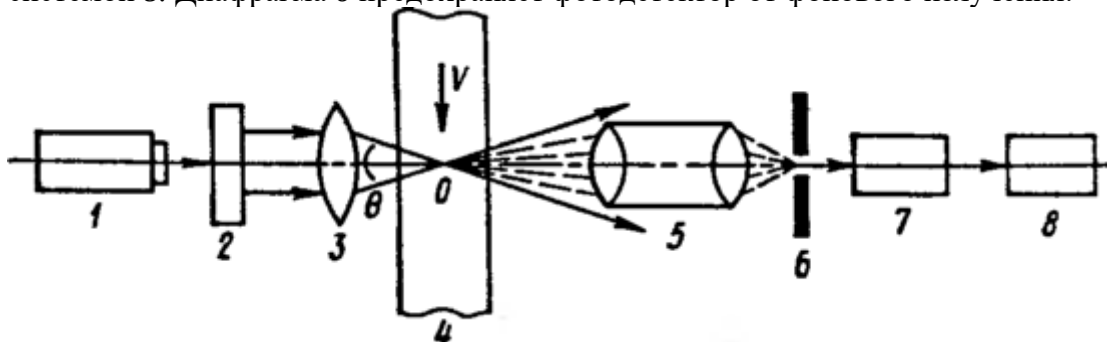


Рис. 10. Принципиальная схема лазерного измерителя скоростей

Для создания рассеивающих центров (зоны движущихся частиц) в жидкостях в настоящее время чаще всего используют полистироловые шарики диаметром 0,5—1,0 мкм, добавляемые в поток с объемной концентрацией 0,002—0,02 %. Для получения сигнала требуемой интенсивности в газах достаточно $0,15 \cdot 10^{-3} \text{ кг/м}^3$ взвешенных примесей и аэрозоля. Эффективным способом получения рассеивающих центров в газах является способ распыления жидкостей (например, воды).

Основными источниками методических погрешностей ДИС являются: неравномерность профиля скоростей потока; турбулентные пульсации скоростей; неоднородность рассеивающих частиц и их „проскальзывание” (несовпадение скоростей) относительно основного потока.

Эти погрешности совместно с аппаратными обуславливают суммарную погрешность измерений расхода с помощью ДИС порядка 1,5—2,0%.

Принципиальная схема расходомера, реализующего эффект Физо-Френеля, показана на рис. 71. Основным элементом расходомера является гелиево-неоновый лазер, резонатор которого образован зеркалами 1,

4, 5, расположенными в вершинах треугольника, и активным элементом

9. Лазер генерирует две встречные волны, бегущие по замкнутым оптическим путям. Поток жидкости или газа, движущийся на некотором участке резонатора по трубопроводу 2 с прозрачными окнами 3, создает различные по знаку приращения оптических путей встречных волн лазера за счет составляющей проекции вектора скорости потока на направление луча. Вследствие этого различны и частоты встречных волн.

Часть энергии встречных лучей выводится из резонатора и зеркалами

6, 8 направляется на фотодетектор 7, в цепи которого появляется фототок разностной частоты биений, пропорциональной скорости потока, осредненной по пути луча.

Инструментальная погрешность описанных расходомеров определяется, в основном, погрешностью измерения частоты биений. Нестабильность частоты биений вызывается механическими вибрациями, изменением температуры окружающей среды, а также процессами, происходящими в плазме ОКГ. Известны „Физо-Френелевские” расходомеры, основная погрешность которых не превосходит 0,5 % верхнего предела измерений.



; Методические погрешности этих расходомеров обуславливаются непостоянством показателя преломления измеряемой среды и отличием скорости, осредненной по длине луча, от действительной средней скорости потока (аналогично, как у рассмотренных выше ультразвуковых расходомеров).

Особенно перспективны данные расходомеры для измерения расхода газов, поскольку частота выходного сигнала при показателях преломления, близких к единице (что характерно для большинства газов), пропорциональна массовому расходу.

Измерение расхода методом контрольных „меток”

Если создать в потоке измеряемой среды какую-либо „метку” (какой-либо отличительный признак части потока, за перемещением которого можно проследить) и измерять время τ_m , за которое эта „метка” пройдет определенный фиксированный путь Z_m , то, считая, что скорость перемещения „метки” v равна скорости потока, получим

*М

Расходомеры, основанные на этом методе измерений, состоят из устройства, периодически создающего ту или иную „метку” потока; устройства, фиксирующего момент прохождения „метки”, и прибора, измеряющего продолжительность перемещения „метки” на фиксированное расстояние L_{fix} .

На основании формулы уравнение измерений этих приборов будет иметь вид

$$v = \frac{L_{fix}}{\tau_m}$$

Погрешности измерения при данном методе не нормируются. Метод, как правило, используется в лабораторных условиях для измерения расхода газа при сверхвысоких скоростях, т. е. там, где другие методы трудно применить.

Расходомеры, основанные на явлении ядерного магнитного резонанса (ЯМР-расходомеры)

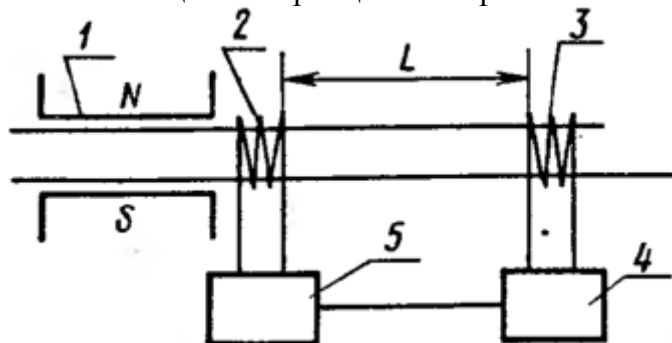
Поляризованные в постоянном магнитном поле атомные ядра большинства элементов, помещенных в переменное осциллирующее поле, при угловой частоте осциллирующего поля, равной угловой скорости прецессии (колебаний относительно среднего положения) ядер (ларморовой частоте), взаимодействуют с ним, поглощая часть его энергии. При этом изменяется намагниченность ядер, т. е. суммарный магнитный момент ядер в единице объема вещества.

Это явление — явление взаимодействия поляризованных ядер с резонансным осциллирующим полем называется ядерным магнитным резонансом.

Существует несколько принципов построения расходомерных устройств, основанных на ядерном магнитном резонансе. Во-первых, явление ядерного резонанса используется для создания „меток” в потоке жидкости.

Схема ЯМР-расходомера, работающего на принципе контрольных меток. Жидкость проходит через магнитное поле, создаваемое магнитом 1 и поляризуется (ядра жидкости ориентируются

относительно силовых линий поля, что обуславливает ее намагниченность). Протекая через катушку 2, на которую подается от генератора 5 переменное напряжение резонансной частоты, поляризованные ядра жидкости поглощают часть энергии осциллирующего поля, создаваемого катушкой, и жидкость деполяризуется. При периодическом отключении тока. Схема ЯМР-расходомера, работающего катушку 2, в потоке тающего на принципе контрольных меток жидкости на выходе из катушки



будут создаваться пакеты поляризованных молекул. Эти молекулы, пройдя фиксированное расстояние L , попадают в катушку 3, которая также питается переменным напряжением резонансной частоты. В моменты протекания поляризованных молекул через осциллирующее поле катушки 5 в ее цепи будет возникать сигнал ядерного магнитного резонанса, фиксируемый измерительной схемой 4. Таким образом, в данном случае измерение расхода сводится к измерению времени между моментом отключения напряжения от катушки 2 и моментом появления сигнала ядерного магнитного резонанса в схеме 4, связанной с катушкой 3. Уравнение измерений расходомеров данного типа не отличается от уравнения измерений метода контрольных „меток”.

Другой принцип работы ЯМР-расходомеров основан на зависимости амплитуды сигнала ядерного резонанса A от скорости течения жидкости V , открытой индийским ученым Сурианом

$$\frac{A-A_0}{A_0} = v \frac{t_p}{l}$$

где A_0 — амплитуда сигнала ядерного резонанса в неподвижной жидкости; t_p — постоянное для данной жидкости время продольной релаксации ядер; l — длина датчика, создающего резонансное поле.

Пользуясь выражением, рабочее уравнение данного типа ЯМР-расходомеров можно представить в виде

$$Q = F C (\sim 7 - 1)$$

где постоянная $K = lF/t_p$; F — калибр расходомера.

Принципиальная схема такого расходомера показана на рис. 74. Участок трубопровода помещен в сильное поляризирующее поле. На концах участка монтируется датчик ядерного магнитного резонанса, на катушку которого подается переменное напряжение резонансной частоты. Поляризованная жидкость, протекая через датчик, дает сигнал ядерного резонанса, амплитуда которого зависит от расхода жидкости. Подобное устройство можно применять для измерения расхода жидкостей с большим количеством ядер (например, жидкости, содержащие водород или фтор), обеспечивающим достаточно

большой сигнал ядерного резонанса. Концентрация ядер должна сохраняться постоянной, в противном случае будет изменяться чувствительность прибора. Концентрация ядер пропорциональна плотности, а следовательно, погрешность показаний прибора зависит от всех факторов (температуры, давления, концентрации и т. п.), влияющих на плотность измеряемой среды. Кроме того, погрешность показаний существенно зависит от качества стабилизации питающего напряжения и наличия внутренних (схемных) и внешних (вызываемых турбулентностью потока) шумов. При аппаратном подавлении этих шумов (что ведет к большой сложности измерительной схемы) погрешность ЯМР-расходомеров при их градуировке на реальной среде может быть сведена к погрешности порядка 0,5—1,0% верхнего предела измерений.

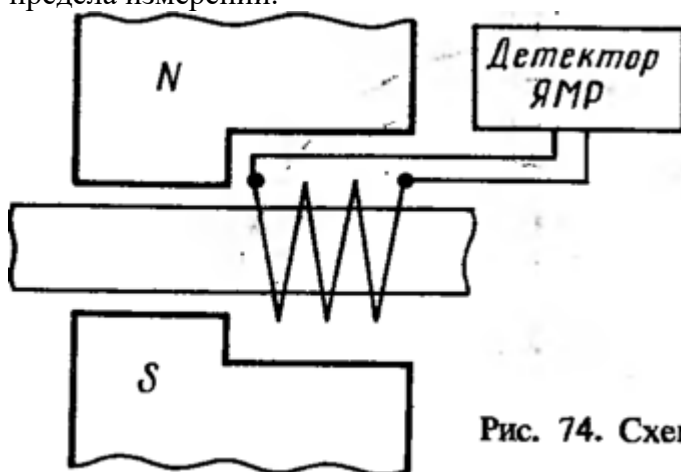


Рис. 74. Схема амплитудного ЯМР-расходомера

К достоинствам ЯМР-расходомеров (значительно окупающим их конструктивную сложность) относят: высокую чувствительность и малый нижний диапазон измерений; бесконтактность измерений; нечувствительность к перемене ориентировки трубопровода в пространстве; линейность шкалы и возможность использования их в системах контроля и регулирования в связи с малой инерционностью и электрическим выходным сигналом датчика в виде напряжения низкой частоты.

В настоящее время ЯМР-расходомеры применяются в основном при лабораторных исследованиях, в биологии и медицине (для измерения расхода крови).

Центробежные расходомеры

Центробежный расходомер представляет собой 360-градусное колено (т. е. полную окружность) трубопровода, в верхней части которого на внешней и внутренней (по радиусу кривизны) стенках отбирают давления p_2 и p_1 соответственно. Ранее применялись и 90-градусные колена, но они не обеспечивали достаточной точности измерений, поэтому в настоящее время рекомендовано применять 360-градусные колена.

Принцип действия центробежных расходомеров основан на том, что при движении среды по криволинейному участку трубопровода появляются центробежные силы, создающие перепад давлений между точками с разными радиусами кривизны (где кривизна больше, там и центробежная сила больше и больше давление на стенку).

Полученные из условия равенства гидростатической и центробежной сил, действующих на элемент объема среды, текущей по криволинейному участку трубопровода (с радиусом кривизны его геометрической оси R_0) рабочие уравнения измерений центробежных расходомеров имеют вид:

для капельных жидкостей

для газов

$$Q = -\frac{f r^2 \log y}{\ln - \alpha} \sqrt{p_2 p_1}$$

где r — внутренний радиус трубопровода; $p_0 = 1/2 (p_1 + p_2)$; ϕ — корректировочный коэффициент, зависящий от вязкости измеряемой среды и шероховатости трубопровода; f

— коэффициент, характеризующий степень неизоэотермичности процесса сжатия газа в цилиндрическом колене.

При $P_2/P_1 < 2$ как для жидкостей, так и для газов с достаточной для практики точностью можно использовать формулу Как показали широкие экспериментальные исследования американских прибористов В. Лансфорда, Д. Картеля и др., коэффициенты ϕ , f при прямолинейном участке трубопровода перед 360-градусным коленом расходомера, большем $2R_0$, стабильны и мало (на 1,0—1,5 %) отличаются от единицы в весьма широком диапазоне изменения вязкости измеряемой среды и ее расхода, что может быть объяснено малостью сил трения по сравнению с центробежными силами.

Отмеченное обстоятельство позволяет сделать вывод о возможности косвенной (расчетной) градуировки центробежных расходомеров с круговым коленом по результатам измерений технологически качественно выдержанных геометрических параметров R_0 и z . При этом их основная погрешность может быть „уложена” в $\pm 2,0$ — $2,5$ % верхнего предела измерений, что соответствует точности расходомеров с сужающими устройствами.

Существенным достоинством центробежных расходомеров является и малая степень влияния пульсационных характеристик потока на их показания. Действительно, так как давления p_1 и p_2 отбираются в одном

сечении потока (а не в разных, как у сужающих устройств) постоянные по сечению пульсационные составляющие будут компенсироваться при измерении разности давлений.

Простота и надежность центробежных расходомеров позволяет применять их в сложных эксплуатационных условиях, характерных для технологических процессов в нефтяной, газовой и химической промышленности.

Вихревые и гидродинамические расходомеры

Вихревые расходомеры сравнительно новые приборы, применяемые для измерения расхода жидкостей и газов с широким диапазоном изменения физико-химических свойств. Принцип действия этих расходомеров заключается в создании (с помощью винтообразных шнеков) в потоке движущейся по трубопроводу среды устойчивого периферийного вихря. Центральная часть потока (вблизи оси трубопровода) при этом приобретает характер винтового шнура. Если сформированный таким образом поток пустить через расширяющийся насадок, то периферийные вихреобразования теряют устойчивость, а центральный шнур начинает прецессировать (колебаться) относительно геометрической оси насадка с частотой, пропорциональной средней скорости потока, и амплитудой, равной диаметру выходной части насадка. С аналогичной частотой и амплитудой, равной скоростному напору pv^2 , будет изменяться при этом и давление на выходе потока из насадка. Преобразовав с помощью амплитудно-частотного датчика (например, струнного) пульсации давления в электрический сигнал и поделив его амплитудное значение на частотное, получим величину, значение которой пропорционально массовому расходу вещества. Для нахождения объемного расхода достаточно измерить частотную составляющую сигнала.

Погрешность вихревых расходомеров при их индивидуальной градуировке на реальной измеряемой среде не превосходит 1,5—2,0 %.

Гидродинамические расходомеры основаны на измерении лобового давления (p_n) движущейся среды, действующего на помещенное в поток тело.

На рис. 76 показаны схемы различных типов гидродинамических расходомеров, отличающихся друг от друга формой тела, воспринимающего гидродинамическое усилие $R = c_d \rho v_{cp}^2 f / 2$ (f — площадь миделево-го сечения тела — проекции тела на плоскость, перпендикулярную к направлению потока) и способом измерения гидродинамического усилия.

Для расходомеров с поворотным крылом (рис. 76, а) и поворотным диском (рис. 76, б) мерой расхода является поворот крыла или диска относительно оси вращения. Уравнение измерений этих приборов, полученное из условия, равенства моментов гидродинамической силы и веса крыла (диска), имеет вид

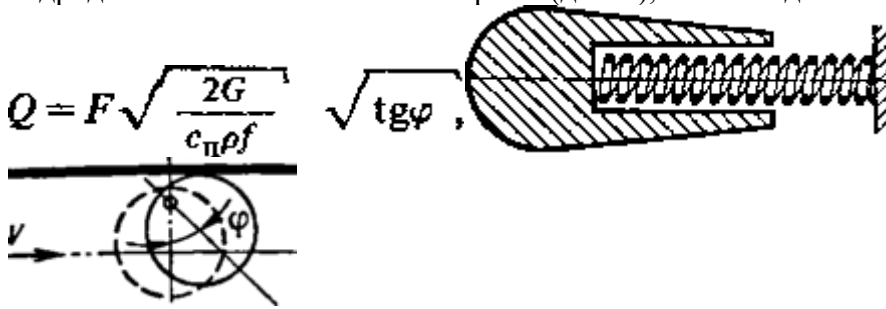
$$Q = F \sqrt{\frac{2G}{c_{\text{л}} \rho f}} \sqrt{\operatorname{tg} \varphi},$$


Рис. 12. Гидродинамические расходомеры

где F — площадь сечения трубопровода; $/$ — площадь наибольшего сечения крыла или диска; G — вес крыла или диска; $c_{\text{л}}$ — коэффициент лобового сопротивления, зависящий от формы и размеров тела обтекания (в данном случае крыла или диска) и чисел Рейнольдса. В расходомере с каплевидным телом обтекания (рис. 12) мерой расхода является деформация упругой пружины, а следовательно, и осевое перемещение l тела обтекания. Уравнение измерений этих приборов имеет вид

$$Q = F \sqrt{\frac{2c}{c_{\text{лр}}}} \sqrt{l},$$

где c — жесткость пружины.

Иногда и первые два типа гидродинамических расходомеров снабжаются упругими элементами в виде пластинчатых или струнных пружин.

Зависимость $c_{\text{л}}$ от большого числа изменяющихся и неконтролируемых в процессе измерений параметров, нестабильность поля скоростей набегающего потока при перемещении тела обтекания являются источниками больших погрешностей этих расходомеров. Вследствие этого основные усилия их разработчиков направлены на отыскание таких форм и габаритных размеров тел обтекания, при которых в достаточно широком диапазоне изменений расхода обеспечивается автомодельность (постоянство) $c_{\text{л}}$. Наиболее полно этим требованиям отвечают крыловидные профили с перекрытием потока порядка 0,5—0,6 и тела обтекания, выполненные в виде концентрических окружностей с перемычками, наружный радиус которых составляет 0,754 радиуса проточной части трубопровода.

Достоинствами гидродинамических расходомеров являются их конструктивная простота, надежность и удобство обслуживания. На сегодняшний день их применяют в качестве индикаторов расхода загрязненных жидкостей и газов.

7.11. Приборы для измерения расхода в единицах массы (массовые расходомеры)

В системах автоматического регулирования теплоэнергетических установок, в ракетной и авиационной технике, в различных химических процессах массовый расход $\{M\}$ является основным физическим параметром, определяющим оптимальные режимы работы объектов и качество процессов. В связи с этим в последнее время у нас в стране и за рубежом интенсивно разрабатываются и внедряются различные приборы для измерения массового расхода. Развитие этой области расходомерии идет по трем направлениям. Во-первых, объемные расходомеры (переменного перепада давления, электромагнитные, турбинные и пр.) снабжаются соответствующими датчиками плотности и

корректирующими схемами; во-вторых, создаются приборы, способные непосредственно измерять прямыми методами массовый расход благодаря особенностям своего принципиального устройства: в-третьих, находят применение комбинированные расходомеры, измеряющие массовый расход косвенными методами путем автоматической обработки результатов прямых измерений связанных с ним параметров.

Несмотря на многообразие предложенных принципиальных схем и конструктивных решений, массовые расходомеры прямого действия можно отнести к двум основным видам: инерционным и тепловым. Принцип действия инерционных расходомеров основан на том, что потоку измеряемого вещества сообщается дополнительное движение, чтобы создать в потоке инерционные эффекты, по которым судят о значении массового расхода. В зависимости от того, какое именно дополнительное движение сообщается потоку (при помощи вращающегося или колеблющегося звена), на чувствительном элементе прибора возникает или усилие Кориолиса, или гироскопический, или инерционный момент. Принцип действия тепловых расходомеров основан на непрерывном нагреве потока (калориметрические расходомеры) или специального элемента, помещенного в поток (термоанемометры). В первом случае массовый расход определяется количеством тепла, обеспечивающим определенную разность температур потока до и после нагревателя; во втором — количеством тепла, теряемым нагретым или непрерывно нагреваемым телом, помещенным в поток измеряемого вещества.

Массовые турборасходомеры.

В турборасходомерах, реализующих инерционный принцип измерений, закручивая поток относительно вектора его актуальной (продольной) скорости.

Момент, необходимый для обеспечения устойчивого вращения потока с угловой скоростью ω , определяется (без учета сил гидравлического трения) соотношением

$$M_{\text{вр}} = J \omega,$$

где J — момент инерции среды.

Учитывая, что $dJ = R^2 dm$ (R — радиус инерции; m — масса вращающейся среды) и $dm/dt = M$ (M — массовый расход среды), из выражения получим общее для всех турборасходомеров уравнение для определения $M_{\text{вр}}$

При торможении предварительно закрученного потока на тормозящее устройство будет действовать момент, соответствующий выражению, и уравнение приборов, использующих эффект торможения закрученного потока, не будет отличаться от выражения

Существует большое число различных модификаций турбинных датчиков массового расхода, отличающихся способами вращения потока, измерения $M_{\text{вр}}$ и значениями R .

Принципиальные схемы датчиков, получивших преимущественное распространение, приведены на рис. 13.

Основным источником методических погрешностей турборасходомеров является непостоянство сил трения в их гидравлическом тракте, обусловленное изменениями вязкости, температуры и других параметров измеряемой среды.

Погрешность измерения массового расхода турборасходомерами может быть доведена до $\pm(0,5—1,0)$ % верхнего предела измерений. Повышение точности лимитируется трудностями поддержания постоянного числа оборотов ведущей (закручивающей поток) турбинки, нестабильностью характеристик упругих элементов, воспринимающих действие инерционного звена, и изменением КПД приводного двигателя при изменении нагрузки (расхода). Кроме того, на показания турборасходомеров (как уже отмечалось выше) влияет изменение параметров измеряемой среды, а их надежность ограничивается наличием изнашивающихся опор.

Кориолисовы и гироскопические расходомеры. В этих расходомерах закручивание и торможение потока производится в помощью вращающихся элементов трубопровода сложной конфигурации.

Кориолисовый расходомер состоит из двух Т-образных участков 2 и 6 трубопровода, сочлененных при помощи гибких соединений 1 и приводимых во вращение с постоянной угловой скоростью со специальным приводным механизмом. Прибор размещен в корпусе 5 (показан условно). При протекании вещества со скоростью v через вращающийся в уплотнительных муфтах 4 элемент трубопровода в потоке возникает направленное против вращения ускорение Кориолиса, равное

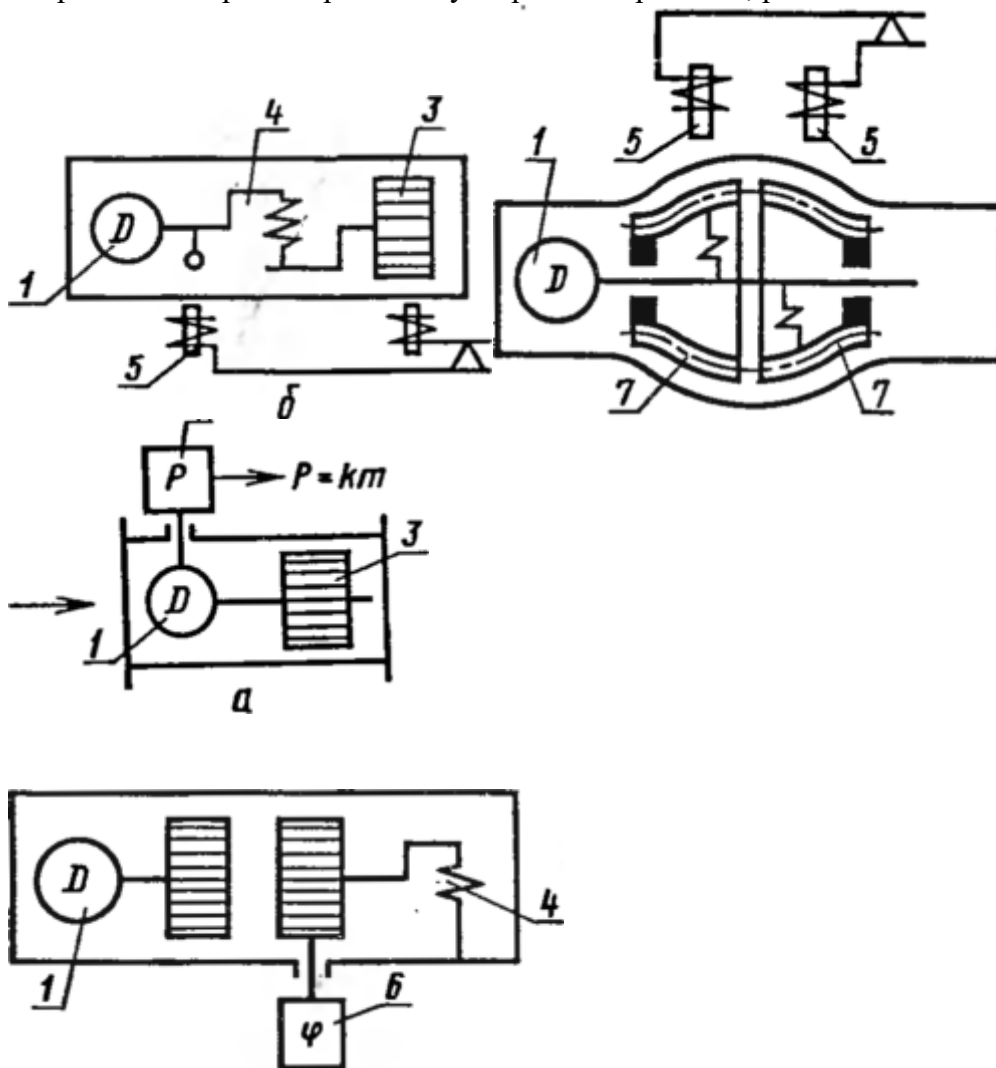
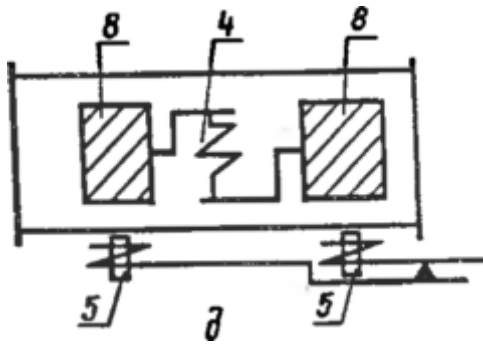


Рис. 13. Принципиальные схемы наиболее распространенных датчиков: а — измеряется мощность, необходимая для закручивания потока; б — измеряется момент вращения по углу поворота упругой муфты; в — измеряется момент вращения заторможенной крыльчатки по углу ее поворота при упругом зацепле*нии; г — измеряется разность углов поворота двух крыльчаток, упруго закрепленных на валу двигателя; д — измеряется относительный угол поворота двух крыльчаток с разными углами поворота лопастей; 1 — двигатель; 2 — датчик мощности; 3 — прямолопастная крыльчатка; 4 — упругое соединение валов; 5 — импульсный датчик; 6 — датчик угла поворота; 7 — радиальная крыльчатка; 8 — спиральная крыльчатка



$a = 2сж$ Вследствие этого в каждой ветви Т-образного участка создается усилие $R_k = — m2ojv - — 2Mco(i?_2 — /?i)$ и на всем вращающемся участке возникает момент $M_k = 2R_k = 2D/co (Rl - Я?)$. (7.38)

В результате действия этого момента Г-образные участки, деформируя гибкое соединение 1, поворачиваются относительно друг друга на некоторый угол α . Угол поворота α преобразуется в электрический сигнал при помощи торсионного датчика 3. Значение этого сигнала пропорционально M_k , а следовательно, при постоянной угловой скорости вращения и массовому расходу вещества.

Гироскопический расходомер состоит из эксцентрично расположенных элементов трубопровода сложной конфигурации. Устрой приводится во вращение относительно оси AA с постоянной угловой скоростью. Возникающий при этом гироскопический момент M_m стремится повернуть ротор относительно оси BB . Величина

$$M_z = 2M_{bl} (Ri - R^b) \quad (7.39)$$

пропорциональна массовому расходу вещества и преобразуется в соответствующий сигнал с помощью датчиков деформации (например, тензо-метрических).

Относительно невысокая точность кориолисовых и гироскопических расходомеров, характеризуемая приведенной погрешностью 1—2 %, объясняется большими температурными влияниями на жесткость упругих элементов, их гистерезисом и последствием, а также трудностями поддержания постоянным числа оборотов приводного механизма, особенно при колебаниях расхода. Расходомеры данного типа громоздки, сложны в эксплуатации, требуют специальных вращающихся уплотнительных устройств и большой мощности приводного механизма.

Два последних недостатка отсутствуют у вибрационных расходомеров, у которых вращательное движение трубопровода заменяется колебательным. Однако точность вибрационных расходомеров получается меньшей.

Преимуществом кориолисовых и гироскопических расходомеров является полная независимость их показаний от вязкости измеряемой среды. Поэтому их целесообразно применять лишь для измерения массового расхода веществ с большим диапазоном изменения вязкости.

Калориметрические и термоанемометрические расходомеры. Если пренебречь теплом, отдаваемым потоком через стенки трубопровода в окружающую среду, то уравнение теплового баланса Между расходом тепла, потребляемым нагревателем, и теплом, сообщенным потоку, принимает вид

$$Qt = \kappa_0 M \cdot c_p \Delta T,$$

где κ_0 — поправочный множитель на неравномерность распределения температур по сечению трубопровода; c_p — теплоемкость (для газа при постоянном давлении) при температуре $T_c + T_2/2$; T_1 , T_2 — температуры потока до и после нагревателя; $\Delta T = T_2 - T_1$.

Тепло к потоку в калориметрических расходомерах подводится обычно электронагревателями, для которых

$$q_t = 0,24pR,$$

где I — сила тока; R — сопротивление нагревателя.

На основании выражений (7.40) и (7.41) получим уравнение измерений (статическую характеристику преобразования) калориметрических расходомеров

$$M = \frac{0,24 IR}{k_0 c_p \Delta T}$$

Возможны и существуют два способа измерения массового расхода в соответствии с выражением:

расход определяют по значению мощности, потребляемой нагревателем и обеспечивающей постоянную разность температур ΔT

расход определяют по разности температур ΔT при неизменной мощности, подводимой к нагревателю.

В первом случае расходомеры работают как регуляторы температуры нагрева потока, у которых измерительным и регулирующим элементом является уравновешенный мост с термометрами сопротивления до и после нагревателя. При изменении разности температур мост выходит из равновесия и включает устройство, которое изменяет регулировочное сопротивление до тех пор, пока не восстановится заданная степень нагрева. Массовый расход при этом определяют по показаниям ваттметра, включенного в цепь нагревателя.

Датчики калориметрических расходомеров второго типа (рис. 80) состоят из двух последовательно соединенных термометров сопротивления 1 и 3, устанавливаемых до и после нагревателя 2. Последовательное соединение термометров обеспечивает равенство токов в их цепях, что позволяет градуировать их непосредственно по разности температур. Кроме термометров сопротивления используют также термисторы и термопары. Термометры сопротивления обладают тем преимуществом, что их можно выполнять в виде равномерной сетки, перекрывающей все сечения потока, и таким образом измерять среднюю по сечению температуру.

Калориметрические расходомеры обладают достаточно высокой точностью, оцениваемой (в условиях индивидуальной градуировки) приведенной погрешностью $\pm (0,5—1,0) \%$, большим диапазоном измерений (10:1 и выше), малой инерционностью.

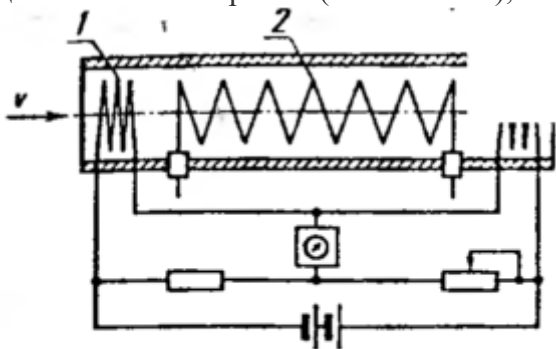


Рис. 80. Схема калориметрического расходомера

Недостатками их являются сложность измерительных схем и нестабильность характеристик, связанная с коррозией приемных устройств и осаждением на них различных частиц, переносимых потоком.

Дачные приборы можно применять для измерения массового расхода как жидкостей, так и газов. Но в настоящее время ими измеряют, главным образом, малые (в трубках диаметром 2—3 мм) и средние расходы чистых газов.

Статическая характеристика преобразования (уравнение измерений) термоанемометров определяется известным уравнением теплофизики

$$Q_t = 0,241^2 B = (T_n - T_c) (X + V 2\tau c_s, \text{сГ } V'v_p''), \quad (7.43)$$

где T_n — температура тела; T_c — температура потока измеряемой среды; X — теплопроводность среды; c_s — теплоемкость среды при постоянном объеме; d — диаметр нагреваемого тела.

Термоанемометры измеряют „массовую” скорость v_p потока в месте установки нагреваемого тела.

В последние годы появились бесконтактные термоанемометрические расходомеры, в которых роль термозлемента играет изолированный участок трубопровода.

Как видно из уравнения, массовую скорость при помощи термоанемометра можно измерять двумя способами. В одном случае ток, нагревающий приемник, поддерживают постоянным, и скорость определяют по результатам измерения его температуры. В другом случае ток нагрева регулируют таким образом, чтобы температура приемника оставалась постоянной, а скорость определяют по значению питающего тока. В практике встречаются оба этих способа измерений.

Приемник термоанемометра (термонить) обычно выполняют из платиновой проволоки диаметром 0,005—0,3 мм. Температура термонити должна быть по возможности высокой, так как при ее увеличении повышается чувствительность приемника и уменьшается влияние колебаний температуры потока. Однако значительное повышение температуры проволоки может вызвать изменение структуры металла и тем самым „снос” градуировочных кривых прибора.

Основным недостатком термоанемометров является существенное влияние на их показания температуры, давления и различных теплофизических параметров измеряемой среды.

В связи с очень малыми габаритными размерами приемника (термо-нити) приборы получили преимущественное распространение в лабораторно-экспериментальной практике при измерении скоростей в тончайших пристенных слоях и пленках жидких и газообразных потоков. До появления оптических (лазерных) методов термоанемометры были единственными приборами, позволяющими проводить такие измерения.

Погрешности термоанемометров до настоящего времени полностью не изучены, и точность выполняемых с их помощью измерений не нормируется.

Комбинированные турбопоршневые расходомеры. Одним из примеров, иллюстрирующим возможность комбинированного измерения массового расхода, являются турбопоршневые расходомеры, состоящие из турбинного с аксиальной крыльчаткой и поршневого преобразователей. Угловая скорость вращения турбинки пропорциональна объемному расходу среды, протекающей по трубопроводу,

$\omega = k_1 Q$. Поршневой преобразователь воспринимает и передает на регистрирующий или показывающий прибор гидродинамическое давление потока, действующее на ступицу турбинки и равное

$$p = k_2 \omega^2$$

где k_1, k_2 — коэффициенты пропорциональности, в общем случае зависящие от числа Рейнольдса и конструктивных параметров преобразователей.

Поделив выражение на выражение, т. е. поделив показания поршневого преобразователя на показания турбинного, получим рабочие уравнения измерений турбопоршневых расходомеров. Так, при измерении массового расхода

$$M = A_m - E, \quad CO$$

$$m_{ce} A_m = h_i / k_2;$$

при измерении плотности протекающей среды

$$P = A_p - E_j,$$

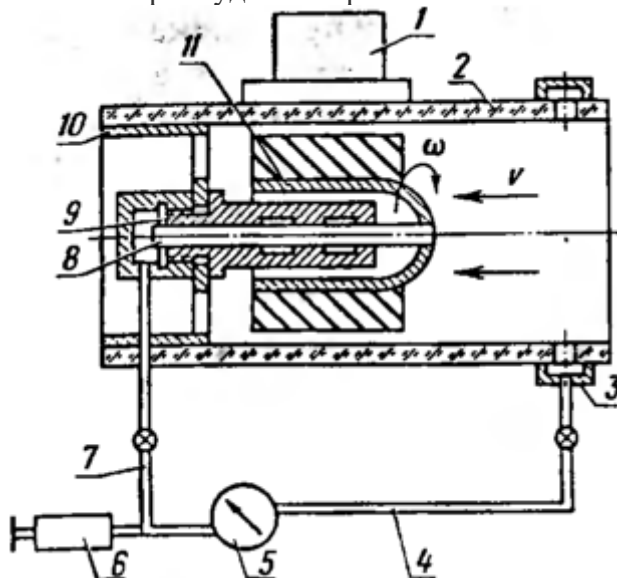
$$\text{т.е. } A_p = \kappa \zeta \kappa_2$$

Используя формулы и, по результатам измерений угловой скорости и гидродинамического давления при известных (определенных в процессе градуировки приборов) коэффициентах A_m и A_p можно рассчитать значения массового расхода и плотности протекающей среды.

Турбопоршневой расходомер работает следующим образом. Турбинка 11 жестко закреплена на поршне 8, который может перемещаться вдоль оси и вращаться относительно неподвижного цилиндра 9, закрепленного в опоре 10. Все детали прибора помещены в корпусе 2.

В цилиндре 9 создается давление, пропорциональное статическому давлению в потоке и гидродинамическому напору, действующему на турбинку 11 и поршень 8 в аксиальном направлении. Это давление по трубке 7, заполненной специальной манометрической жидкостью, передается в одну из полостей дифференциального манометра 5. Во вторую полость дифманометра по трубке 4 подается статическое давление, отбираемое из кольцевой

Рис. 12. Схема турбопоршневого расходомера 3. Следовательно, диф-мера манометр 5 будет измерять толь



ко динамическую составляющую давления потока, действующую на поверхность турбинки и выражаемую формулой. Поршневая пара 8—9 имеет микронные зазоры, что обеспечивает чисто жидкостное трение в поршневом датчике и весьма малые утечки манометрической жидкости, заполняющей систему дифманометра. Для пополнения утечек в систему введен прессб. Угловая скорость вращения турбинки измеряется счетным устройством 1.

Основными достоинствами турбопоршневых расходомеров являются: возможность одновременного и комплексного измерения объемного, массового расхода и плотности протекающей по трубопроводу среды; высокая точность измерений, обусловленная объединением в этих приборах двух прецизионных измерительных преобразователей — турбинного и поршневого и характеризуемая погрешностями измерений объемного расхода 0,1—0,2 %, массового расхода и плотности 0,3—0,5 %; отсутствие опор с сухим трением, а следовательно, высокая стабильность и надежность турбопоршневых приборов.

Специфическим недостатком данных расходомеров являются утечки манометрической жидкости в измеряемую среду. Однако эти утечки могут быть сведены к ничтожно малым известными и применяемыми в системах с неуплотненным поршнем конструктивными мероприятиями. При измерении же расхода нефтепродуктов и других жидкостей, которые могут быть использованы в поршневых системах при соответствующем подборе материалов поршневых пар в качестве манометрических, этот недостаток вообще не сказывается.

В связи с достаточно высокой точностью и надежностью турбопоршневые расходомеры используют в настоящее время в качестве образцовых расходоизмерительных устройств. Естественно, возможны и другие комбинированные системы для измерения массового расхода, например, одновременное использование сужающего устройства и турбинного датчика и пр. Однако точностные возможности этих систем получаются существенно меньшими.

Техника измерения расхода жидкостей и газов в трубопроводах больших диаметров Проблема измерения расхода в трубопроводах больших диаметров (свыше 1 м) является самостоятельной расходоизмерительной проблемой, которая решается своим специфическим путем. Это обуславливается тем, что использование для этих целей расходомеров, реализующих традиционные методы (описанные в предыдущей главе), требует колоссальных затрат как на создание самих приборов, так и на создание средств их индивидуальной градуировки и поверки, которые в настоящее время практически полностью отсутствуют.

Последнее обстоятельство и определяет, в основном, те специфические требования, которые предъявляются к методам и средствам измерения расхода в трубопроводах больших диаметров:

возможность косвенной (расчетной) градуировки без применения расходомерных стендов и установок;

инвариантность (независимость) градуировочных характеристик к диаметру трубопровода или возможность их пересчета с малых диаметров (для которых имеются образцовые установки) на сколь угодно большие.

Показания ультразвуковых расходомеров зависят от распределения скоростей по сечению потока, которое в свою очередь зависит от числа Рейнольдса и, следовательно, от вязкости. В то же время, как следует из принципа действия и рабочего уравнения ЯМР-расходомеров, изменения вязкости измеряемой среды не влияют на их показания.

Парциальный метод измерения расхода основан на измерении расхода определенной части основного потока,¹ отведенной в байпасную или обводную трубку.

Часть потока отводится обычно при помощи сужающего устройства, установленного в трубопроводе так, как это показано на рис. 13.

Для измерения расхода в байпасной трубке можно применять любой из рассмотренных в гл. 7 расходомеров.

метода измерения расхода:

1 — байпасная трубка; 2 — расходомер; 3 — пиафрагма, установленная в основном трубопроводе

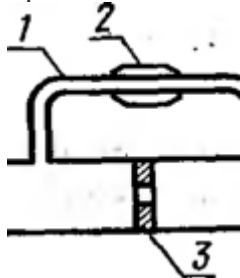


Рис.13

Если между расходом Q в основном трубопроводе и расходом q в байпасе существует стабильная функциональная зависимость $Q = f(q)$, то по результатам измерения q в каждом конкретном случае Q . Для этого необходимо лишь определить зависимость между Q и q при непосредственной (в ограниченной области) или расчетной градуировке (например, по соотношению сопротивлений основного и байпасного трубопроводов). Погрешность измерения расхода парциальным методом будет складываться из погрешностей установления и стабильности зависимости $Q = f(q)$ и измерения расхода в байпасе.

Измерение расхода методом гидравлического удара. Гидравлический удар, возникающий при быстром перекрытии потока капельной жидкости (за счет инерционного воздействия внезапно остановленной массы жидкости), вызывает колебания давления в трубопроводе, фронт которых распространяется со скоростью звука. Процесс изменения давления в сечении трубопровода, находящемся на расстоянии L перед перекрывающей поток задвижкой, графически изображен на рис. 14, на котором

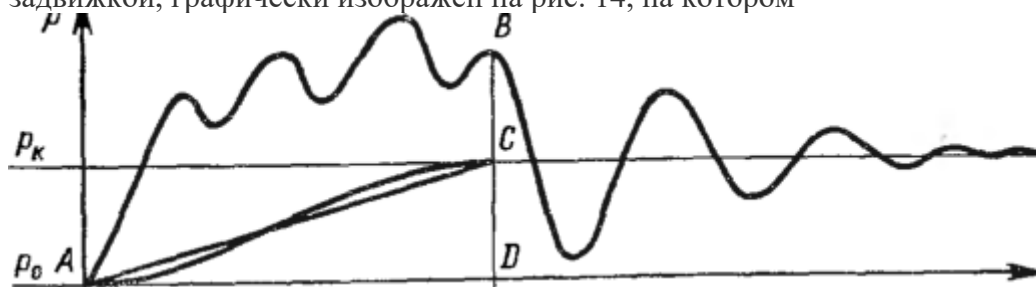


Рис. 14. График изменения давления в трубопроводе при гидравлическом ударе p_0 — начальное статическое давление в контрольном сечении; p_k — конечное статическое давление в том же сечении. Точка A соответствует началу перекрытия потока задвижкой, точка B — окончанию. Затухающие колебания после закрытия задвижки (по истечении времени Δt) характеризуют лишь инерционные свойства прибора, примененного для записи изменений давления.

Линия AC характеризует изменение давления, связанное с изменением гидравлического сопротивления задвижки при перемещении ее затвора, а линия AB — изменение давления вследствие гидравлического удара.

Закон количества движения при гидравлическом ударе имеет вид

$$\int_0^{\Delta t} p L Q = F \int_0^{\Delta t} p dt,$$

где $\int_0^{\Delta t} p dt$ — импульс ударной волны, равный площади под диаграммой изменения давления, ограниченной линиями AB и AC; F — площадь сечения трубопровода.

Откуда искомым объемный расход

$Q = \frac{1}{L} \int_0^{\Delta t} p dt$. Таким образом, планиметрируя диаграмму изменения давления, измерив предварительно диаметр трубопровода (а, следовательно, и F), длину контрольного участка, и плотность протекающей среды, по выражению можно рассчитать объемный расход.

Данный метод применяют при испытаниях гидравлических машин и насосов, т. е. в тех случаях, когда расход можно измерять после воспроизведения (а не в процессе испытаний) определенных режимов испытаний.

Измерение расхода с помощью интегрирующей трубки. Интегрирующая трубка представляет собой цилиндрический зонд, полностью пересекающий поток по диаметру водовода. По образующей трубки просверлен ряд отверстий для отбора давления набегающего потока.

Статическая характеристика интегрирующей трубки имеет вид

$Q = V \cdot \omega / f \sim D_p'$ где D_p — перепад давлений, отбираемых в конце интегрирующей трубки и со стенок водовода; ω — коэффициент расхода трубки; ω_0 — площадь сечения отверстий.

Автомодельность коэффициента расхода для трубок с отношением толщины стенки к диаметру отверстия, равным 0,33, наступает при числе Рейнольдса, больших 10^6 .

Значение ip при этом устойчиво стремится к единице.

В этих условиях возможность расчетной градуировки интегрирующих трубок обуславливается соответствием величины y/ω — &средней скорости потока.

Однако влияние температуры измеряемой среды, пульсаций давления и расхода, трудности технологического порядка не позволяют на сегодняшний день получить погрешности измерения расхода интегрирующими трубками, меньшие 6—8 %. Кроме того, область применения данных устройств ограничивается измерением расхода чистых однофазных веществ.

Методы смешения. Принцип измерений, лежащий в основе этих методов, заключается в следующем. В протекающее по трубопроводу вещество вводят раствор реагента („прививку”) и определяют кратность разбавления этого реагента в потоке вещества.

Уравнение баланса реагента, вводимого в поток, имеет вид

$$qC_t + QC_0 = (Q + q)C_2, \quad (7.51)$$

где q — расход раствора реагента, вводимого в поток; C_0, C_t, C_2 — концентрации реагента соответственно в среде до „прививки” в растворе реагента и в смеси, отбираемой из потока после „прививки”.

В соответствии с выражением (7.51) уравнение измерений данным методом будет

$$C_2 - C_0 = K \cdot C_0$$

где $K = \frac{C_2 - C_0}{C_0}$ — коэффициент разбавления.

$$C_2 - C_0$$

Если в самом измеряемом веществе не содержится примесей вводимого реагента или они ничтожно (по сравнению с C_2) малы, то $K = \frac{C_2}{C_0} - 1$.

Расход q может быть измерен с достаточно высокой точностью, чего нельзя сказать о точности измерения величины K . Действительно, если концентрация реагента (C_2) в отбираемом из потока пробе ненамного превышает его концентрацию в „чистой” среде (C_0), а именно к этому и стремятся при реализации метода, то даже незначительные погрешности измерений C_2 и C_0 приведут к существенно недостоверной оценке величины K .

Другой разновидностью методов смешения является метод интегрирования, заключающийся в том, что в поток вещества за малый промежуток времени вводят определенную объемную порцию V раствора реагента и непрерывно (в течение времени t) следят за изменением концентрации C реагента в потоке.

Уравнение этого метода, полученное на основе баланса объемных количеств реагента, имеет вид

$$Q = \frac{V}{t} \cdot \frac{1}{C} \cdot \frac{dC}{dt}$$

Методы смешения используют в настоящее время исключительно для измерения расхода воды в цилиндрических водоводах. В качестве реагентов в растворах с концентрацией 10^{-4} — 10^{-5} мг/д применяют дихромат натрия, хлорид натрия, родамин и другие химически пассивные к воде вещества (в основном, соли). Применяют и радиоактивные „прививки”, например, изотопы брома, натрия, йода. Использование радиоактивных реагентов позволяет осуществить бесконтактные измерения, однако требует обеспечения специальных, условий работы.

.. Основным источником погрешности определения расхода методами смешения является .неравномерность распределения, концентрации вводимого реагента по сечению, в котором отбирают пробы. Относительная неравномерность распределения концентрации, а следовательно, и вызываемая ею погрешность, зависит от расстояния L_c между устройствами для ввода раствора реагента в поток и отбора проб (расстояния смешения), а

также характеристик потока. Для обеспечения приемлемых (меньших 1,5 %) значений погрешности L_c должно быть большим $6QD$ (D — диаметр трубопровода).

Предложено несколько способов уменьшения неравномерности распределения концентрации и сокращения L_c . Например, одновременное впрыскивание, раствора реагента с помощью ряда инжекторов, равномерно расположенных на кольцевой линии, радиус которой составляет 0,63 радиуса трубопровода; искусственная турбулизация потока на участке смешения с помощью различных местных сопротивлений; отбор проб в нескольких точках сечения потока и определение осредненной концентрации. Особенно эффективен последний способ.

При соблюдении оптимальных условий погрешность измерения расхода методами смешения (без учета влияния турбулентности, изменений температуры, наличия примесей и т. п.), по-видимому, может быть оценена в 1,5—2,5 % верхнего предела измерений.

Однако достоверных данных на этот счет до настоящего времени не имеется.

Основным достоинством методов смешения является отсутствие необходимости определения площади сечения трубопровода.

„Точечные” методы основаны на измерении локальной скорости в одной какой-либо точке потока и определении расхода по теоретической или эмпирической зависимости между измеренной локальной и средней скоростями потока.

Локальную (местную) скорость можно измерять различными методами (оптическими, акустическими, тепловыми) и приборами (трубки скоростного напора, микровертушки, термоанемометры, электромагнитные измерители скорости и др.).

По существу, если известна модель развитого турбулентного потока, с достаточной точностью описывающая распределение его скоростей, то локальную скорость при реализации „точечного” метода можно измерять в любой фиксированной точке потока. Однако отсутствие такой (метрологически пригодной) модели обусловило практическое использование на сегодняшний день лишь двух модификаций „точечного” метода — метода средней скорости и метода максимальной скорости.

К контрольному вопросу № 14

Вы неправильно ответили на вопрос.

Разберитесь как следует в физических принципах, лежащих в основе ультразвуковых и ЯМР-расходомеров. Ведь вполне возможно, что в своей практической деятельности Вам придется столкнуться с этими новыми достаточно универсальными расходоизмерительными устройствами.

Суть первого метода заключается в измерении локальной скорости в точке, где скорость равна средней скорости потока. Тогда по результатам предварительных измерений диаметра трубопровода и показаниям измерителя местной скорости (ИМС) можно определить расход.

По уточненным данным А.Д. Альтшуля ордината точки, где скорость равна средней скорости развитого осесимметричного турбулентного потока

$z_0 = 0,777R$, где R — радиус трубопровода в месте установки ИМС.

Соотношение и положено в основу метода средней скорости.

Погрешности измерений z_0 , установки ИМС, изменение местоположения точки средней скорости при изменении чисел Рейнольдса, коэффициента гидравлического трения, турбулентные пульсации — все это обуславливает погрешность измерения данным методом, равную 4—6 % верхнего предела измерений.

Второй метод — метод максимальной скорости заключается в измерении скорости на оси трубопровода (максимальной) и определении расхода по уточненным соотношениям между максимальной и средней скоростями потока.

Достоинствами второго метода являются: стабильность ординаты точки (всегда жестко фиксирована на геометрической оси осесимметричного потока), в которой скорость максимальна; независимость ординаты от чисел Рейнольдса и характеристик потока; наибольшая удаленность места установки ИМС от стенок трубопровода, что существенно

снижает требования к его габаритным размерам. Так, при установке ИМС в точке средней скорости наибольшая площадь сечения ИМС не должна превышать 0,01 площади сечения трубопровода, при установке же ИМС на оси трубопровода отношение площадей может быть увеличено до 0,06.

Использование наиболее универсального соотношения между средней и максимальной скоростями развитого осесимметричного турбулентного потока дает следующее рабочее уравнение измерений расхода методом максимальной скорости

$Q = \pi R^2 S (0,75 + 0,0275 \lg \frac{R}{r_m})$ (S — показания ИМС, установленного на оси трубопровода радиусом r_m) и позволяет оценить погрешность метода в 3—5 % верхнего предела измерений.

Суть кросс-корреляционного метода заключается в определении функции корреляции между случайными пульсациями скорости в двух точках (A и B) турбулентного потока, отстоящими друг от друга на расстояние L .

Так как функция корреляции случайных величин характеризует степень их связи и степень их взаимообусловленности во времени, то очевидно, что максимум ее будет соответствовать времени перемещения турбулентных возмущений из точки A в точку B (так как степень временной взаимообусловленности тех же самых пульсаций, естественно, максимальна).

Полученный вывод справедлив и для осредненных по сечению потока пульсационных составляющих скоростей.

Таким образом, зафиксировав пульсационные составляющие скоростей в двух сечениях потока, отстоящих друг от друга на расстояние L , определив (с помощью специального прибора — коррелографа) функцию корреляции между ними и измерив (автоматически или непосредственно по рис. 84) значение времени t_m , соответствующее максимуму (пику) этой функции ϕ_{xy} , можно определить расход потока по формуле

$$Q = F V_m$$

Сам метод прост, однако его аппаратная реализация, требующая наличия ультразвуковых или лазерных измерителей пульсационных составляющих скоростей, коррелографа и устройств автоматической регистрации t_m довольно сложна.

При компенсации наиболее существенных методических и аппаратных погрешностей точность метода соответствует приведенной погрешности $\pm(2—2,5) \%$ в диапазоне значений измеряемых расходов 15:1.

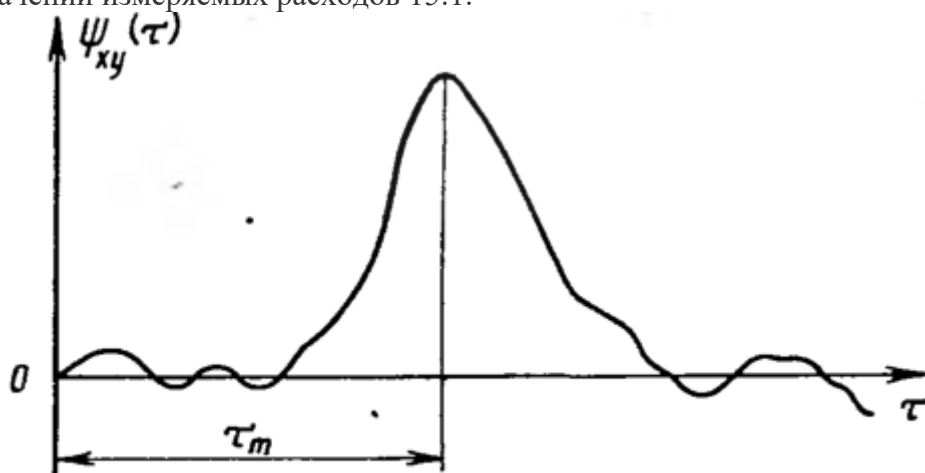


Рис. 84. Кросс-корреляционная функция турбулентного потока

Измерение расхода многофазных сред

В расходоизмерительной практике довольно часто встречаются задачи, связанные с измерением расхода двух- или трехфазных сред. К наибо-

лее типичным промышленным средам относятся влажный пар, нефтегазовые смеси, пульпы, пылеугольное топливо (смесь воздуха с угольным порошком), водогрунтовые смеси, низкокипящие криогенные вещества, поток которых в отдельных случаях представляет смесь жидкой, газообразной и твердой (шуги) фаз.

Трудности обеспечения приемлемой (в некоторых случаях довольно высокой, характеризуемой допускаемой погрешностью 2—3 %) точности измерения расхода таких сред обуславливаются множеством физических и технических причин, главные из которых — различие скоростей течения фаз через первичные преобразователи применяемых расходомеров (например, сужающие устройства); неоднородность распределения фаз по сечению потока; значительные флуктуации скоростей, давлений и концентраций фаз.

Основными параметрами многофазных сред, определяющими отличительные особенности их движения по трубам и степень влияния указанных выше причин на точность измерения расхода, являются массовая концентрация фаз в потоке и их плотность. Вследствие этого, как правило, приходится измерять расход таких сред в единицах массы (массовый расход) или объемный расход и плотности, фаз, что также вносит дополнительные технические трудности.

Наличие значительных флуктуаций параметров многофазных сред при их течении по трубам и каналам затрудняет, а в ряде случаев делает невозможным, измерение мгновенных или осредненных за малый промежуток времени значений расхода. Так, при движении газожидкостных смесей по трубам при некоторых концентрациях (относительном содержании) жидкой и газообразной фаз и определенных скоростях поток смеси приобретает „пробковый” характер (смесь движется в виде последовательных „пробок” жидкости и газа, занимающих все сечение трубопровода, — то только жидкость, то только газ). Естественно, при этом понятие мгновенного расхода смеси теряет смысл. Вследствие отмеченного на практике в большинстве случаев измеряют средний (осредненный за достаточно большой промежуток времени — не менее 40—60 с) расход многофазных потоков.

Среди множества измерительных задач, возникающих в практике измерения расхода многофазных сред, можно выделить две наиболее типичные:

- 1) измерение общего (суммарного) расхода среды (смеси);
- 2) измерение расхода отдельных компонентов (фаз) смеси, например, сухой части влажного пара или твердой фазы во взвешенном потоке.

Каждая из этих задач решается своими специфическими техническими способами и приемами.

Так, для измерения общего (суммарного) расхода M_c диспергированных двухфазных сред (сухой пар + влага; воздух + угольная пыль и

т. п.) наиболее распространены расходомеры с сужающими устройствами.

Как показали результаты теоретических и экспериментальных исследований, рабочая формула измерений при этом (связь между расходом и перепадом давлений Δp на сужающем устройстве) имеет вид

Данная формула отличается от рассмотренных ранее уравнений метода переменного перепада давлений тем, что в нее входит коэффициент $1/3$, зависящий в общем случае от массовой концентрации γ тяжелой фазы (массовой доли тяжелой фазы в смеси), плотностей легкой ρ_l и тяжелой ρ_t фаз, геометрии сужающего устройства и скоростей течения фаз в приемном преобразователе. Кроме того, сомножителем перед Δp в данную формулу входит плотность смеси

$\rho_c =$

$$\frac{\rho_l}{1 - \eta(1 - \frac{\rho_l}{\rho_t})}$$

Если скорости легкой и тяжелой фаз при течении смеси через приемный преобразователь несущественно отличаются друг от друга (что характерно, например, для стандартных диафрагм, у которых участок сужения при достаточно больших m очень короткий и вследствие этого частицы тяжелой фазы на этом участке почти не ускоряются), то в ограниченной области значений η ($0,77 < \eta < 0,9$ — для влажного пара; $V < 0,35$ — для смеси воздуха с угольным порошком) коэффициент

$\eta = 1 - \eta$

Во многих случаях отношение ρ_l/ρ_t много меньше 1. Так, для влажного пара $\rho_l/\rho_x = 0,001-0,005$; для пылеугольного топлива это отношение еще меньше.

$$\rho_c \approx \frac{\rho_l}{1 - \eta}$$

Тогда на основании формулы и уравнение измерений с учетом выражений преобразуется к виду $LG_c(1 - \eta) = aeFo V 2\rho_l Dp$.

Как следует из этой формулы, перепад давлений на диафрагме (при сделанных допущениях и в ограниченной области значений η) характеризует лишь массовый расход $M_l = M_c (1 - \eta)$ легкой фазы. Этот вывод, подтвержденный экспериментально, объясняется тем, что при принятом равенстве скоростей легкой и тяжелой фаз энергия на ускорение тяжелой фазы не затрачивается.

Таким образом, при использовании стандартной диафрагмы расход легкой фазы (сухой части влажного пара или воздуха для пылеугольного топлива) может быть определен по уравнению

$$M_l = aeFo V 2\rho_l Dp_d,$$

где Dp_d — измеренный перепад давлений при течении смеси; коэффициент расхода a принимается равным табличному значению.

При известной массовой концентрации тяжелой фазы η полный расход смеси вычисляют по формуле

$$M = M_l / (1 - \eta).$$

$$M_c = M \eta = \frac{M_l \eta}{1 - \eta}.$$

расход тяжелой фазы

$M_c = M_l \frac{\eta}{1 - \eta} = \frac{aeFo V 2\rho_l Dp_d \eta}{1 - \eta}$. В случае, если η неизвестна или изменяется в процессе измерений, приходится определять ее по результатам измерения перепада давлений на дополнительно устанавливаемых в поток смеси трубе или сопле Вентури -

Ap_v . Отношение (или разность) Ap_v и Dp_d характеризует часть энергии потока, затрачиваемой на ускорение твердой фазы при течении смеси через трубу или сопло Вентури (напомним, что при течении смеси через диафрагму ускорение твердой фазы практически не наблюдается). Следовательно, данное отношение будет пропорционально содержанию твердой фазы η .

Для расчетов [17] используют экспериментально-апробированную зависимость

$$\frac{Ap_v}{Dp_d} = \frac{A}{1 - \eta} \approx \frac{A}{1 - \eta_0} \quad (7.65)$$

где A — коэффициент, зависящий от свойств твердой фазы и геометрии применяемых сужающих устройств и определяемый путем опытной градуировки комплекта расходомеров.

Тогда в соответствии с формулой

$$M_c = \frac{A Dp_d}{1 - \eta} \quad (7.66)$$

где $A = Dp_v / Lp_a$.

Таким образом, при измерениях расхода методом переменного перепада давлений двухфазных сред с неизвестной массовой концентрацией твердой фазы измеряют перепады давлений на двух последовательно установленных сужающих устройствах (диафрагме и сопле или трубе Вентури), по формулам рассчитывают расход легкой фазы и M_l , а затем по формулам — общий расход смеси и расход твердой фазы. Расчетные

операции при этом могут выполняться вычислительными устройствами, заблокированными со вторичными преобразователями расходомеров.

Еще раз подчеркнем, что все изложенное справедливо для хорошо диспергированных двухфазных штоков с равномерной концентрацией фаз и в ограниченной области значений $7]$.

Расходомеры переменного перепада давлений довольно часто применяют и для измерения расхода различных пульп и водогрунтовых смесей. Характерной особенностью данных сред является то, что плотности их легкой и тяжелой фаз мало отличаются друг от друга. В этом случае суммарный расход смеси определяют по уравнению, в котором коэффициент R принимают равным единице.

Расход смесей твердой и жидкой (или газообразной) фаз измеряют комбинированными методами, основанными на определении общего объемного расхода смеси и содержания в ней твердой фазы. Объемный расход смеси измеряют при этом с помощью электромагнитных, ультразвуковых, ядерно-магнитных и расходомеров других типов, приемные преобразователи которых не имеют выступающих внутрь потока элементов. Расходомеры устанавливают на вертикальных участках трубопровода для предотвращения скапливания более тяжелой фазы в нижней части сечения трубы.

Содержание твердой фазы определяют по показаниям радиоизотопных концентратомеров, радиоактивных или компенсационных весовых плотномеров.

Наибольшее применение находят весовые плотномеры, представляющие собой участок трубопровода с гибкими сочленениями, подвешенный на ленточных опорах. При изменении массы смеси, протекающей по данному участку, он перемещается в вертикальном направлении вместе с плунжером индуктивной катушки. Перемещение плунжера вызывает сигнал рассогласования, приводящий во вращение электродвигатель. При этом изменяется натяжение уравновешивающей пружины, что возвращает участок в исходное положение. Угол поворота электродвигателя, фиксируемый ферродинамическими преобразователями, является мерой плотности протекающего вещества.

Компенсационные весовые плотномеры в комплекте с электромагнитными расходомерами получили преимущественное применение для измерения расхода твердого топлива (угля, торфа) при его гидротранспорте.

Расход пульп, сыпучих материалов, нефтегазовых смесей измеряют и массовыми расходомерами, в основном — кориолисовыми. Предпочтительное применение этих расходомеров объясняется тем, что измеряемая среда в приемном преобразователе кориолисовых расходомеров движется перпендикулярно к оси вращения потока и вследствие этого „кориолисовы” усилие и момент не зависят от распределения фаз.

В заключение отметим, что совершенствование техники измерений расхода многофазных сред сдерживается отсутствием высокоточных образцовых стендов и установок, способных воспроизводить все характерные особенности течения таких сред (структуру потока, геометрию и распределение фаз). И хотя кое-какие сдвиги в этой области определенно наметились, работы здесь „непочатый край”.

Одной из перспективных отечественных разработок, восполняющих этот пробел, является созданная во Всесоюзном научно-исследовательском институте расходомерии (ВНИИР) исходная образцовая установка, реализующая принцип смещения потоков жидкости и газа для воспроизведения и измерения параметров газожидкостных потоков (рис. 85).

Установка работает следующим образом. Жидкость (вода) из резервуара 10 насосом 13 через систему стабилизации напора, состоящую из бака 8,

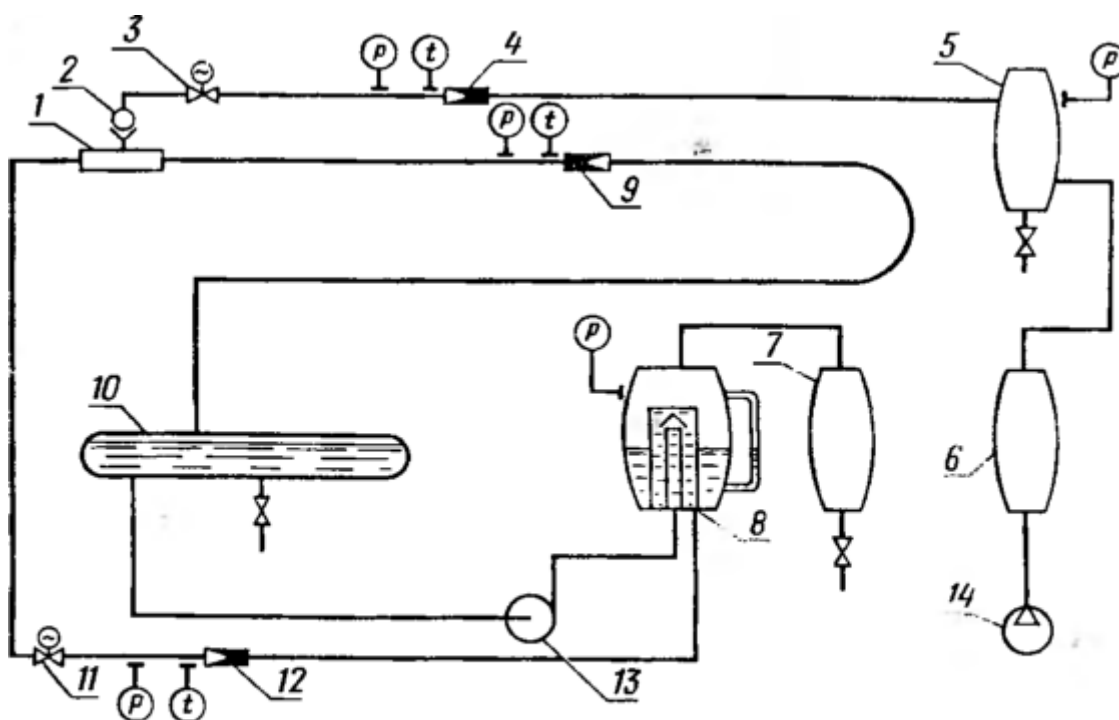


Рис. 85. Принципиальная схема образцовой газожидкостной установки

где поддерживается постоянный уровень жидкости, и воздушного ресивера 7, подается в смеситель 1. Расход жидкости регулируется задвижкой 11 и измеряется турбинным расходомером 12. Одновременно с этим компрессором 14 через ресивер 6, узел стабилизации расхода 5 и эжектор 2 в смеситель подается воздух. Расход воздуха регулируется задвижкой 3 и измеряется турбинным расходомером 4. Из смесителя газожидкостная смесь подается в испытательный участок, на котором устанавливается градуируемый или поверяемый расходомер 9, и затем сбрасывается в резервуар 10, где она сепарируется (разделяется на газ и жидкость). Давление и температуру смеси контролируют при помощи измерительных преобразователей, обозначенных на схеме p и t соответственно.

Кроме того, для измерения действительной расходной концентрации и идентификации различных режимов течения смеси (дисперсного, разделенного, пробкового) установка снабжена емкостным измерителем ее диэлектрической проницаемости.

Метрологические исследования и аттестация установки показали, что осуществляя рассмотренный принцип смешения и используя для отдельных измерений расхода жидкости и газа индивидуально аттестованные турбинные расходомеры, возможно обеспечить воспроизведение и измерение расхода газожидкостных потоков с погрешностью, не превышающей 0,8—1,0%.

Измерение переменных расходов

В практике измерения переменных расходов приходится иметь дело с двумя наиболее типичными измерительными задачами:

измерение мгновенного значения расхода, что характерно, для систем автоматического регулирования технологическими процессами, управления работой энергетических установок или измерений в условиях существенного систематического „тренда” (монотонного возрастания или уменьшения) расхода;

измерение среднего (осредненного за достаточно большой промежуток времени) расхода, что характерно для систем учета или измерений пульсирующих относительно какого-либо среднего значения расходов.

Качественное (обеспечивающее приемлемую точность измерений) решение каждой из этих задач достигается правильным выбором динамических характеристик применяемых расходомеров или умением оценить дополнительную динамическую погрешность при известных динамических характеристиках расходомеров.

Наиболее полно динамические свойства любой измерительной системы (ее инерционность, обуславливающую запаздывание и искажение выходного сигнала относительно входного) описываются переходной характеристикой — зависимостью выходного сигнала от изменяющегося во времени входного при заданных параметрах измерительной системы.

В расходоизмерительной практике наиболее часто приходится иметь дело с двумя классами приборов, отличающихся видом переходной характеристики, а следовательно, и обобщенными динамическими свойствами. К первому классу относятся расходомеры, представляющие собой инерционное звено первого порядка, переходная характеристика которых описывается линейным дифференциальным уравнением первой степени $T \frac{dy}{dt} + y = Q(t)$, где y — выходной сигнал (показания) расходомера, выраженный в единицах входного сигнала (расхода) $Q(t)$; T — постоянная времени расходомера, с. Величина T характеризует инерционное запаздывание выходного сигнала и определяется следующим образом. Если на вход прибора подать скачкообразный импульс расхода LQ , то в соответствии с переходной характеристикой изменение выходного сигнала Ly будет описываться уравнением

$Ay = AQ$ (Из этого уравнения следует, что полное соответствие выходного сигнала действительному значению расхода (при TFO) наступит лишь при $t = \infty$, т. е. в связи с инерционностью расходомера переходный процесс (процесс установления действительного значения выходного сигнала) длится бесконечно долго.

При $t = T$, как следует из формулы, $Dy_T = 0,632DQ$. Следовательно, постоянная времени T соответствует времени, в течение которого изменение выходного сигнала достигает значения 0,632 от полного скачкообразного импульса входного сигнала.

Напомним еще раз, что значения выходного сигнала при этом должны быть выражены (через коэффициент преобразования или по именованной шкале) в единицах входного.

К расходомерам, переходная характеристика которых описывается линейным дифференциальным уравнением первой степени вида, относят, например, турбинные, тепловые и гидродинамические. Естественно, такое „отнесение” носит приближенный характер, однако существенно облегчает практические расчеты динамических погрешностей расходомеров.

Так, решение уравнения для случая изменяющегося с постоянной скоростью a расхода ($Q = at$) имеет вид

$$y = a(t-T) + aTe^{-t/T}. \quad \text{П.69)}$$

Следовательно, абсолютная динамическая погрешность измерения расхода в этом случае

$$\Delta y = y - at = aT(e^{-t/T} - 1), \quad \text{а максимальное ее значение}$$

$$\Delta y_{\max} = aT.$$

Решение уравнения для случая пульсирующего (относительно среднего значения Q_{cp}) с амплитудой B и частотой ω расхода ($Q = Q_{cp} + B \sin \omega t$) имеет вид

$$y = Q_{cp} + \frac{BV}{\sqrt{1 + T^2 \omega^2}} \sin(\omega t + \epsilon)$$

$$\text{где } y = \frac{Q}{O} \text{ — —; } \epsilon = \arctg \frac{T\omega}{1}.$$

$$y/O)^2 T^2 + 1$$

Следовательно, относительная динамическая погрешность измерения мгновенных значений пульсирующего расхода приборами, представляющими собой инерционное звено первого порядка

$$\delta_{\text{д}} = \frac{B}{Q_{cp}} \sqrt{1 + T^2 \omega^2} \sin \epsilon$$

Максимальное значение этой погрешности

$$\delta_{\text{д}}^{\max} = \frac{B}{Q_{cp}} \sqrt{1 + T^2 \omega^2}. \quad (7.73)$$

$$J_{\text{шаг}} \omega / \pi, \text{ — — — — — } \delta_{\text{д}}^{\max}$$

$$\Delta \cos^2 \gamma^2 + 1$$

И наконец, на основании формулы относительная динамическая погрешность измерения средних (осредненных за время T_0) значений пульсирующего расхода

$$BT \sin \gamma (1 - \cos \gamma) + \sin \gamma$$

Формулы позволяют определить расчетное значение постоянной времени T по заданным допускаемым значениям динамических погрешностей (при известных a , B , γ , $Q_{\text{ср}}$) или оценить

эти погрешности при известных расчетно или экспериментально определенных значениях γ .

Величина T зависит от характеристик (массы, геометрических размеров, моментов инерции и других) подвижных элементов и линий связи измерительных преобразователей расходомеров.

Так, для турбинных расходомеров с аксиальным ротором постоянная времени определяется выражением

$$\Gamma = \frac{1}{2} (p' + p)$$

$$pQ / \gamma$$

где I — длина лопасти ротора; S — площадь живого сечения потока в зоне ротора; ρ , ρ_p — плотности измеряемой среды и материала ротора соответственно; J_p , $J_{\text{ж}}$ — моменты инерции плоского сечения ротора и сечения, заполненного жидкостью, соответственно.

Как следует из формулы, в общем случае T зависит не только от конструктивных параметров измерительных преобразователей, но и от значений входного сигнала Q .

Переходная характеристика расходомеров второго класса (к которым относят расходомеры переменного и постоянного перепада давлений) описывается линейным дифференциальным уравнением второго порядка

$T_1 \ddot{y} + T_2 \dot{y} + y = Q(t)$, где T_1 характеризует время или круговой период свободных колебаний подвижной системы прибора, а постоянная времени T_2 — время запаздывания прибора.

Отношение $(3 - T_1^2/T_2^2)$ называется степенью успокоения или демпфирования прибора. Выводы, аналогичные приведенным выше (для инерционных звеньев первого порядка), дают следующие выражения для оценки относительных динамических погрешностей расходомеров данного класса:

$$\delta' = \frac{1}{3} (e^{-\gamma} - 1), \quad T = \sqrt{m^2 - m'^2}$$

где γ — коэффициент затухания при измерении мгновенных значений расхода

нотонно изменяющегося с постоянной скоростью a расхода;

$$O. (7-78)$$

где $a = \frac{1}{T} \ln \frac{Q_1}{Q_2}$ — при измерении мгновенных значений

$\sqrt{(1 - b^2) / (1 + 4/3 b^2)}$ и T — период пульсирующего с амплитудой B и частотой ω расхода;

$$- 4 \ln \frac{Q_1}{Q_2} \cdot T_c \cdot \omega$$

где $e = \arctg \frac{B}{T_c \omega}$ — при измерении осредненных за время T_0

$$- C$$

значений пульсирующего расхода.

Как следует из приведенных формул, динамические погрешности расходомеров при известном виде переходной характеристики целиком определяются их постоянными времени (T — для линейных переходных характеристик первого порядка, T_1 и T_2 — для линейных переходных характеристик второго порядка). Чем меньше T ; T_1 и T_2 , тем лучше инерционные свойства прибора и тем меньше динамические погрешности измерения параметров переменных расходов. Обычно T_1 в 3—4 раза меньше постоянной времени запаздывания T_2 (T), которая у турбинных и тепловых расходомеров составляет 0,005—0,1 с, у ротаметров — 0,5—3 с (в зависимости от массы поплавка, геометрических параметров поплавка и трубки), у электромагнитных и ультразвуковых расходомеров — 0,0001—0,001 с, у расходомеров с сужающими устройствами (в зависимости от типа и

конструктивных особенностей используемых дифманометров, длин и диаметров соединительных трубок, плотности заполняющих систему дифманометров жидкостей) — 0,5—10 с.

Следовательно, расходомеры переменного перепада давлений в общем случае являются наиболее (среди других типов расходомеров) инерционными приборами и наименее пригодны для измерения параметров переменных расходов. Данное обстоятельство усугубляется и наличием у этих расходомеров дополнительной динамической погрешности, обусловленной квадратичной зависимостью расхода и перепада давлений. Действительно, квадратный корень из измеренного дифманометром среднего перепада давлений больше среднего значения корня из перепада, характеризующего осредненный за время T_0 расход, т. е.

$$\sqrt{\frac{1}{Q_0} \int_0^{T_0} (P_i - P_2) dt} > \sqrt{\frac{1}{Q_0} \int_0^{T_0} (P_i - P_2) dt}.$$

Вследствие этого при измерении средних значений пульсирующего с амплитудой B расхода будет возникать дополнительная погрешность $\Delta Q/Q = (V_1 + \dots) 0\%$. И тем не менее в практике довольно часто встречаются случаи измерения пульсирующих расходов расходомерами переменного перепада давлений. Наилучшим способом уменьшения существенных динамических погрешностей при этом является сглаживание пульсаций специальными фильтрами-успокоителями. Отметим, что этот способ пригоден и для уменьшения динамических погрешностей расходомеров любых типов. Пульсация сглаживается тем сильнее, чем больше объем системы V (включая и емкость фильтра-успокоителя) между источником пульсаций и сужающим устройством и чем больше падение давления на этом участке, соответствующее среднему расходу Q_{cp} .

Для оценки сглаживающего эффекта служит безразмерный критерий успокоения пульсаций, предложенный П.П. Кремлевским

$$\kappa = \frac{1}{\sqrt{4P}} \quad \text{или} \quad K = 4n\kappa,$$

где κ — показатель адиабаты измеряемой среды (в случае измерения пульсирующих расходов газов или пара).

Необходимая величина κ (или K), обеспечивающая приемлемые значения динамических погрешностей расходомеров переменного перепада давлений, зависит от характера пульсаций. Для одноцилиндровых гидравлических машин характер пульсаций определяется коэффициентом подачи S , равным отношению времени m_5 движения потока за один период ко времени t_0 полного периода, т. е. $S = m_5/t_0$.

Для многоцилиндровых гидравлических машин коэффициент неравномерности расхода ζ равен отношению m .

Лабораторная работа № 3. Изучение конструкции и поверка одного из вторичных приборов.

Цель работы:

1. Ознакомиться с принципом действия и устройством сильфонного манометра
2. Ознакомиться с устройством и работой вторичного пневматического прибора.
3. Ознакомиться с устройством и работой технического манометра.
4. Ознакомиться с устройством и работой задатчика.

3. Ознакомиться с методикой и произвести регулировку и поверку сильфонного МС-П.

Теоретическое обоснование

1 Принцип действия преобразователя давления МСП

Назначение

Преобразователи давления входят в общий комплекс унифицированной системы взаимозаменяемых компенсационных преобразователей ГСП и используются в комплекте с вторичными приборами, регуляторами и другими устройствами автоматики, машинами централизованного контроля, и системами управления, работающими от стандартного пневматического выходного сигнала 0,2—1 кгс/см².

Преобразователь давления – прибор предназначенный для работы в системах автоматического управления, контроля и регулирования производственных процессов с целью выдачи информации об измеряемом давлении или заряджении газа или жидкости в виде унифицированного аналогового выходного сигнала.

^ Технические характеристики

Рабочий диапазон изменения выходного сигнала от 0,2 до 1 кгс/см².

Питание приборов производится очищенным от пыли, влаги и масла сжатым воздухом под давлением $1,4 \pm 0,14$ кгс/см². Расход воздуха питания преобразователей, в установившемся режиме превышает 3 л/мин.

Температура «точки росы» воздуха питания должна быть не менее чем на 10°С ниже температуры воздуха, окружающего прибор.

Предельное расстояние передачи выходного сигнала по трассе 300 м (внутренний диаметр трубки 6—8 мм).

Зона нечувствительности, то есть, изменение измеряемой величины, необходимое для получения заметного изменения выходного сигнала, не должна

превышать 0,1% диапазона измерений.

В зависимости от используемого усилительного реле приборы предназначены для работы в следующих окружающих условиях: приборы предназначены для работы при температуре окружающего воздуха от —50 до +50° С.

Датчики могут работать при отрицательной температуре только в том случае, если исключены: высасывание конденсата из измеряемой среды (для датчиков, измеряющих давление газообразных сред); замерзание, кристаллизация среды или выкристаллизовывание из нее отдельных компонентов (для датчиков, измеряющих давление жидкостей).

Для измерения параметров вязких, горячих, кристаллизующихся сред и сред, агрессивных по отношению к указанным ниже материалам, манометры с верхними пределами измерений не выше 600 кгс/см² (кроме манометров абсолютного давления), мановакуумметры и вакуумметры по согласованию с заводом-изготовителем поставляются в комплекте с разделительными устройствами, изготовленными из материалов, предусмотренных техническими условиями на эти устройства.

Для изготовления сопротивляющихся с измеряемой средой деталей приборов (кроме манометров сверхвысокого давления) применяются нержавеющие стали.

Вес манометров сверхвысокого давления не более 8 кг, остальных приборов — не более 7 кг.

Преобразователи могут применяться во взрывоопасных помещениях.

По устойчивости к механическим воздействиям преобразователи изготавливаются в обыкновенном исполнении по ГОСТ 12997-76.

Принцип действия

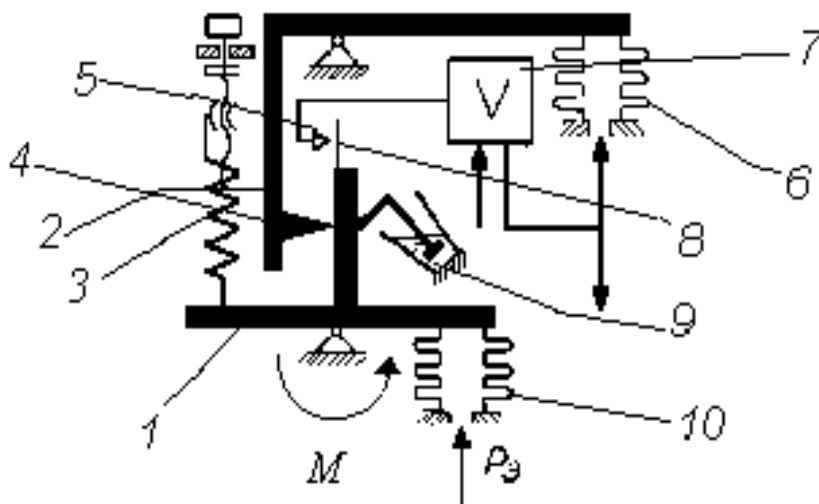
Пневмосиловой преобразователь предназначен для непрерывного преобразования усилия, развиваемого чувствительным элементом преобразователя, в стандартный пневматический выходной сигнал и может использоваться в различных преобразователях, в которых изменение измеряемого параметра может быть преобразовано в изменение силы. Пневмосиловой преобразователь может быть использован также как самостоятельное изделие.

Принцип действия прибора основан на пневмосиловой компенсации.

Измеряемое давление или разрежение преобразуется на чувствительном элементе измерительного блока в пропорциональное усилие, которое автоматически уравнивается усилием, развиваемым давлением сжатого воздуха в сильфоне обратной связи. Это давление является выходным сигналом преобразователя.

Преобразователи построены по блочному принципу. Основным блоком преобразователя является пневмосиловой преобразователь

Принципиальная схема пневмосилового преобразователя представлена на рисунке 1. Усилие с которым измерительный блок воздействует на пневмосиловой преобразователь, создает момент M , вызывающий незначительное перемещение рычажной системы передаточного механизма и связанной с рычагом 1 заслонки 8, относительно неподвижного сопла 5.



1,2 – Рычаг передаточного механизма; 3 – Пружина корректора нуля; 4 – Подвижная опора; 5 - Сопло; 6 – Сильфон обратной связи; 7 - Пневмореле; 8 - Заслонка; 9 - Демпфер;

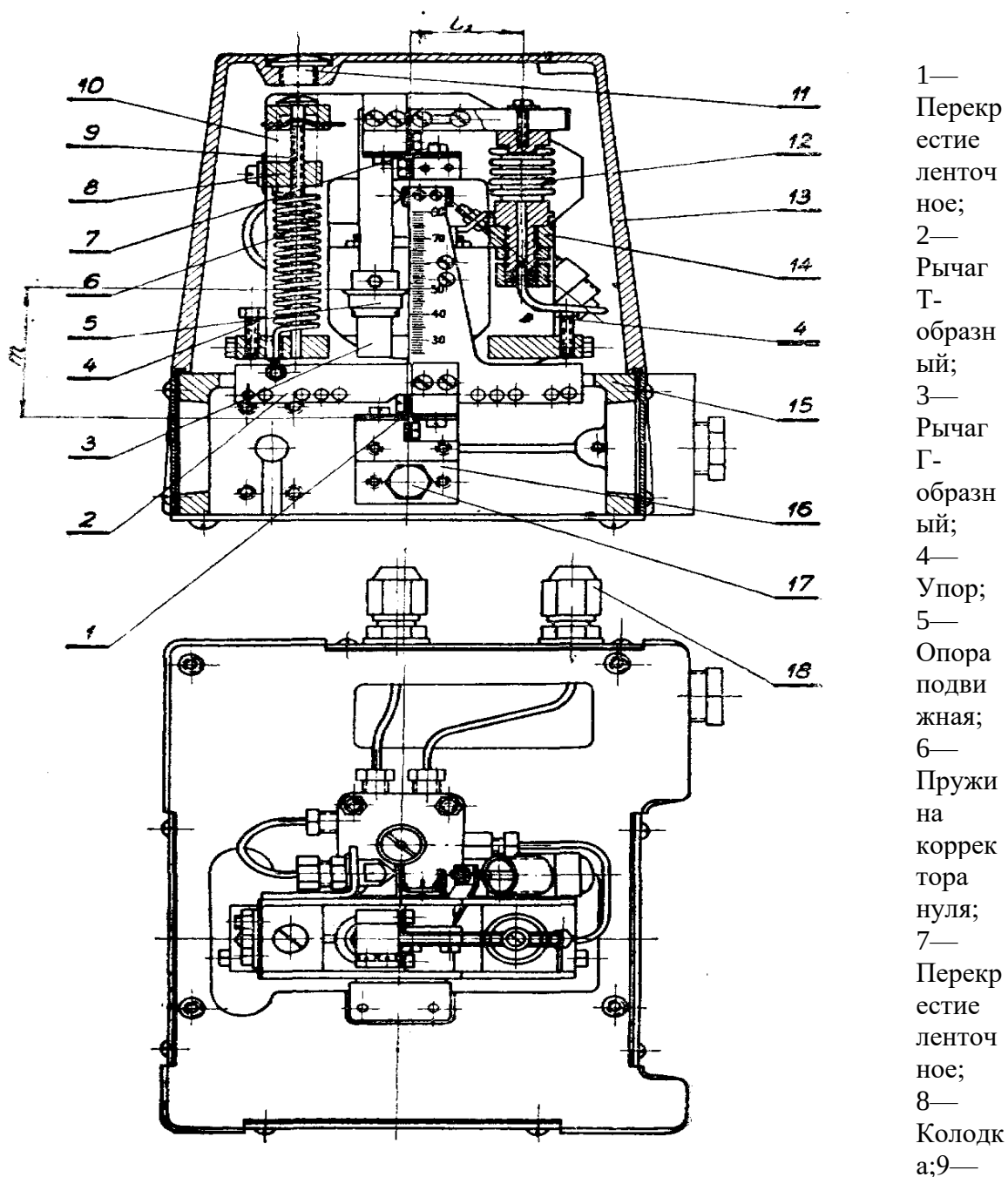
10 – Чувствительный элемент; P1 – Давление питания; P2 – Выходной сигнал; P3 – Измеряемое давление или разрежения; М – Момент воздействующий на преобразователь;

Рисунок 1 – Схема пневматическая принципиальная измерительного преобразователя и пневмосилового преобразователя давления.

Возникший в линии сопла сигнал, управляет давлением поступающим с пневмореле 7, в сильфон обратной связи 6.

Пневмосилового преобразователя (рисунок 2) состоит из следующих основных элементов: передаточного механизма, сильфона обратной связи, индикатора рассогласования и пневмореле.

Передаточный механизм смонтирован между двумя платами 10. Усилие передается от Т – образного рычага 2 к Г – образному рычагу 3 через подвижную опору 5



Винт корректора нуля; 10—Плата; 11—Заглушка; 12— Сильфон обратной связи; 13— Кожух; 14—Колодка; 15—Рама; 16—Колодка; 17—Болт конический; 18—Штуцер; 19— Пневмореле; 20—Демпфер.

Рисунок 2 - Преобразователь пневмосиловой

2 Принцип действия вторичного прибора ПКР

Назначение

Прибор контроля пневматический регистрирующий ПКР.1 предназначен для непрерывной записи на ленточной диаграмме и показания по шкале величины одного, ПКР.2 – двух параметров, изменение которых преобразовано в изменение давления воздуха от 20 до 100 кПа (от 0,2 до 1,0 кгс/см²).

Приборы применяются в схемах автоматического контроля управления и регулирования теплоэнергетических параметров технологических процессов: давления, перепада давления, расхода уровня, разрежения, температуры, состава и свойств веществ.

Технические характеристики

Диапазон изменения входного сигналов от 20 до 100 кПа (от 0,2 до 1,0 кгс/см²)

Предел допускаемой основной погрешности, выраженной в процентах от номинального диапазона изменения входного сигнала, не должен превышать $\pm 0,5$ для приборов с классом точности 0,5 и $\pm 1,0$ для приборов с классом точности 1,0.

Приборы изготавливаются с линейными диаграммами и шкалами 0-100. Шкалы и диаграммы в соответствии со стандартными рядами для манометров дифференциальных, в том числе расходомеров, манометров, вакуумметров, мановакуумметров, оговоренные заказами, поставляются в комплекте прибора.

Скорость перемещения диаграммной ленты 20 мм/ч (40, 60 или 1200 мм/ч по спецификации заказа)

Приборы могут работать в среде с относительной влажностью до 80% при температуре от минус 10 до плюс 60⁰С. Давление воздуха питания приборов (140 $\pm$ 14) кПа (1,4 $\pm$ 0,14 кгс/см²).

Содержание в воздухе питания пыли, масла, влаги и агрессивных примесей должно соответствовать классам загрязнённости 0 или 1.

Длина шкалы 100 мм.

В приборах синхронный двигатель привода диаграммы питается от сети переменного тока напряжением 220 В, частотой 50 Гц.

Масса приборов не превышает:

ПКР.1 – 4,0 кг.

ПКР.2 – 4,5 кг.

Расход воздуха питания, не более

ПКР.1 – 1,3 л/мин.

ПКР.2 – 3,0 л/мин[8].

Принцип действия

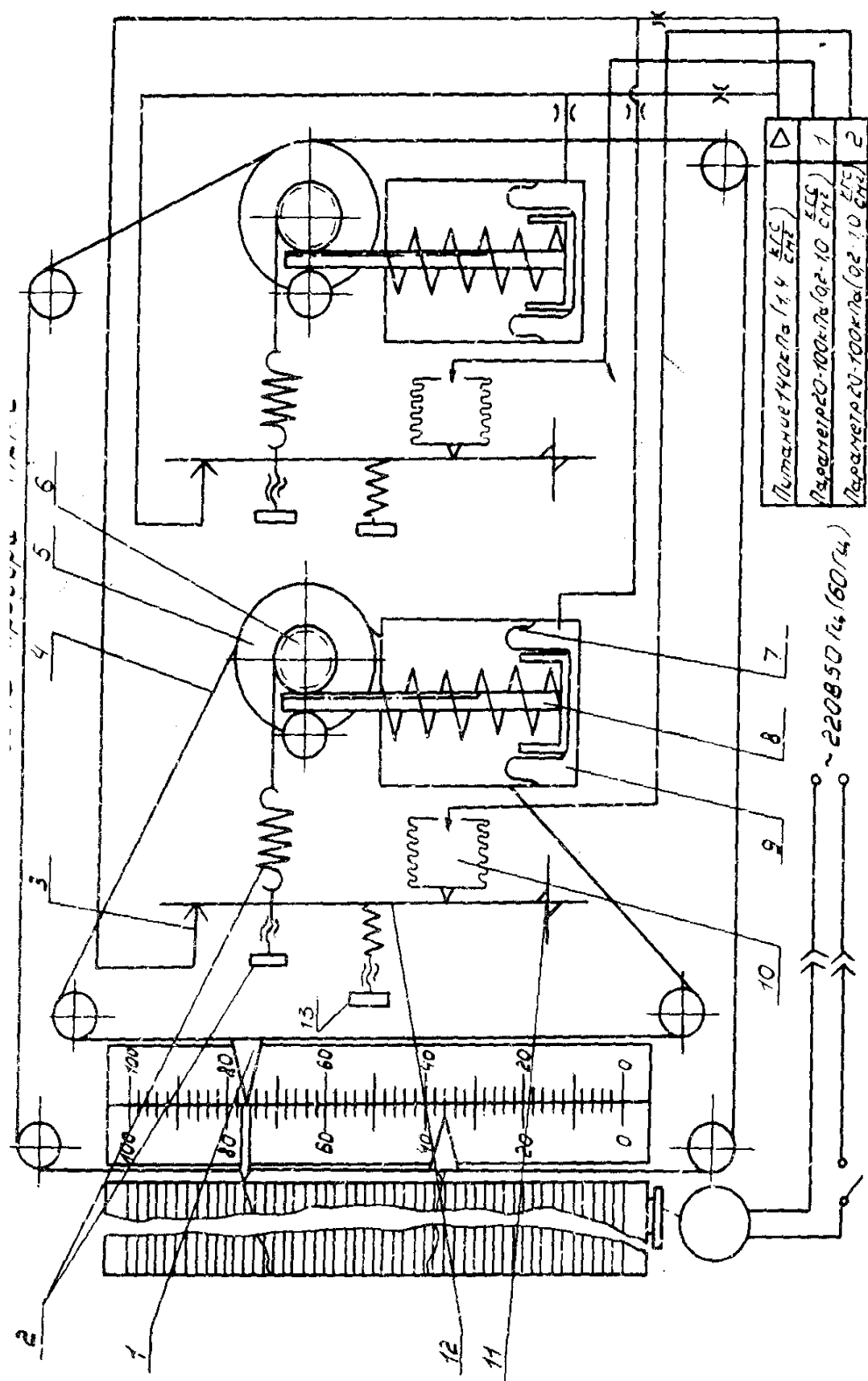
Прибор состоит из следующих основных узлов:

- измерительного механизма (преобразователя P/α);
- лентопротяжного механизма; редуктора с электродвигателем; пневматического разъёма;
- механизма перемещения каретки с пером и стрелкой;
- дроссельной колодки; шасси; корпуса.

Принцип действия измерительного механизма приборов основан на методе силовой компенсации, при котором момент, развиваемый чувствительным элементом, уравнивается моментом пружины обратной связи. Принципиальные схемы приборов приведены на рисунках 3 и 4.

Входной сигнал в виде сжатого воздуха поступает в сильфон 10. Усилие, развиваемое сильфоном, передается на рычаг 12, который, поворачиваясь вокруг упругой опоры II, перекрывает сопло 3.

Изменение входного сигнала вызывает изменение зазора между соплом и рычагом, что приводит к изменению давления в линии сопла, а следовательно, и в полости цилиндра 9 пневматического сервомеханизма. Изменение давления в цилиндре вызывает перемещение поршня 8 уплотненного мембраной 7. Поступательное движение поршня с помощью реечной передачи преобразуется во вращательное движение выходного вала 6, на котором закреплён шкив 5, приводящий в движение посредством тросика 4 каретку с пером и стрелкой. Поршень сервомеханизма будет перемещаться, поворачивая выходной вал и тем самым менять натяжение пружины обратной связи до тех пор, пока создаваемый натяжением пружины момент не уравновесит момент, создаваемый сильфоном. Новому состоянию равновесия соответствует новое положение стрелки прибора.



Принцип действия технического манометра назначение

Манометр предназначен для измерения давления рабочей среды.

Принцип действия

Принцип действия манометра основан на зависимости между измеряемым давлением и упругой деформацией одновитковой трубчатой пружины 10 (рисунок 5).

Измеряемое давление, поступающее через штуцер держателя 18 в пружину, вызывает перемещение ее свободного конца с наконечником 6, которое при помощи поводка 4 и трибко - секторного механизма 2 преобразуется в поворот стрелки 14, напрессованной на конусную поверхность трибки 15.

Для выбора люфтов в механизме служит спиральная пружина 7, которая при сборке манометра закручена на 1 ... 1,5 оборота трибки.

Механизм манометра за нижнюю пластинку 8 крепится двумя винтами 9 к держателю, который в свою очередь крепится двумя винтами 5 к корпусу 17 манометра.

Все винты поставлены на клее БФ-4. Циферблат 13 и стекло 12 крепятся в корпусе при помощи разжимного кольца 11.

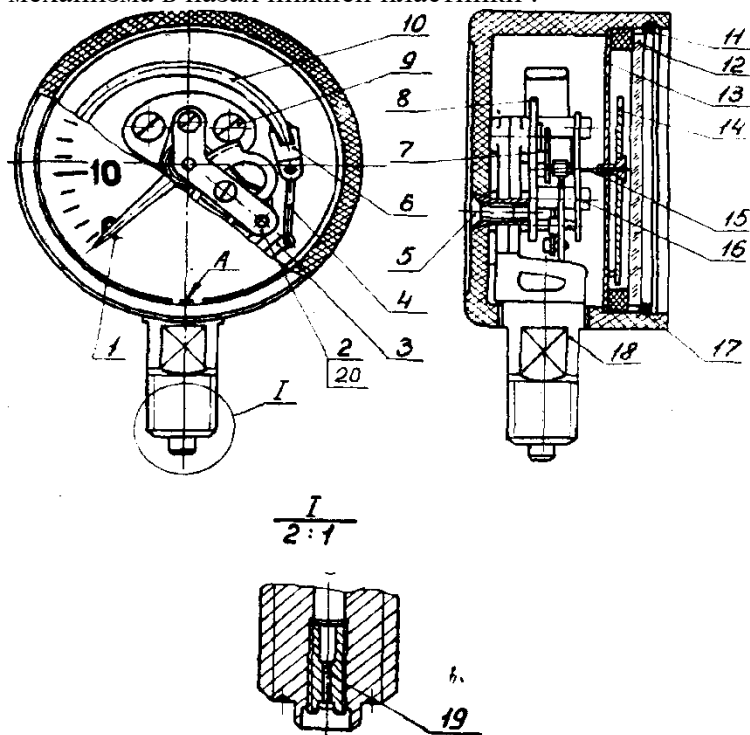
Для сглаживания пульсаций быстроизменяющегося давления и предохранения полости трубчатой пружины от засорения служит демпфер 19.

Манометры с демпфером поставляются только по требованию заказчика.

С целью компенсации растяжки трубчатой пружины и отхода стрелки от нулевого деления упор 1 и нулевое деление шкалы смещены в сторону увеличения показаний на величину абсолютного значения предела допускаемой основной погрешности.

Манометр имеет место для пломбирования (А), исключающее возможность доступа внутрь прибора без повреждения пломбы.

Опломбированные манометры поставляются по требованию заказчика. Регулировка манометра производится изменением длины хвостовика зубчатого сектора 3 и поворотом механизма в пазах нижней пластинки.



1 — упор; 2 — трибко-секторный механизм; 3 — зубчатый сектор; 4 — поволоок; 5 — винт; 6 — наконечник; 7 — спиральная пружина; 8 — нижняя пластинка; 9 — винт; 10 — трубчатая пружина; 11 — разжимное кольцо; 12 — стекло; 13 — циферблат; 14 — стрелка; 15 — трубка; 16 — винт; 17 — корпус; 18 — держатель; 19 — демпфер; 20 — верхняя пластинка

Рисунок 5 - Конструкция манометра

Манометр образцовый типа МО

Действие прибора основано на использовании зависимости между измеряемым давлением и упругой деформацией одновитковой трубчатой пружины, перемещение свободного конца, в которой передаточным механизмом преобразуется в угловое перемещение стрелки.

Шкала прибора имеет 400 условных единиц. Кроме того, она продолжена за конечные отметки на 5 условных единиц. Дополнительные деления служат для отсчета отклонения показаний поверяемых рабочих приборов на нуле и верхнем пределе измерений.

Прибор имеет корректор нуля, обеспечивающий диапазон корректировки от 8 до 16 условных единиц. При выпуске из производства корректор обеспечивает перемещение стрелки от нулевой отметки не менее чем на 4 условные единицы в каждую сторону.

Для предохранения трубчатой пружины, стрелки и передаточного механизма от деформаций или смещений, возникающих при вакуумировании и транспортной тряске и приводящих к нарушению регулировки, в приборах с верхним пределом измерений до 25 кгс/см² предусмотрен арретир.

Принцип действия редуктора давления и задатчика

Редуктор давления РДФ с фильтром

Назначение

Редуктор давлений с фильтром РДФ-3 предназначен для регулирования и автоматического поддержания давления воздуха, необходимого для питания приборов и средств автоматизации, а также для очистки воздуха от пыли, масла и влаги.

Редуктор применяется для питания сжатым воздухом одного прибора или контура регулирования и рассчитан для работы при температуре окружающей среды от минус 50 до плюс 60 °С и относительной влажности до 95 % при температуре 35 °С и при более низких температурах, без конденсации влаги. Редуктор выпускается двух модификаций:

РДФ-3-1—с манометром (основная модификация);

РДФ-3-2 — без манометра, но с заглушенным резьбовым отверстием под манометр. Кроме того, редуктор может выпускаться в исполнении для тропического климата РДФ-3-1 Т, РДФ-3-2Т.

Технические характеристики

Максимальный расход воздуха, м³/ h 1,6

Допускаемое давление питания, МПа 0,25—0,6

Пределы регулирования давления на выходе, МПа 0,02—0,2

Допускаемое отклонение выходного давления при температуре окружающего воздуха (20 ± 5) °С, МПа, при изменении:

входного давления воздуха от 0,25 до 0,8 МПа

расхода воздуха от 0,15 до 1,6 м³/ч 0,01

Отклонение выходного давления при изменении температуры окружающей среды на каждые 10 °С, МПа 0,002

Степень загрязненности воздуха на выходе:

содержание твердых частиц размером 5—10 μm, мг/м³,
не более 2

Габаритные размеры, мм, не более:

с манометром 140x115X98

без манометра 140X115X64

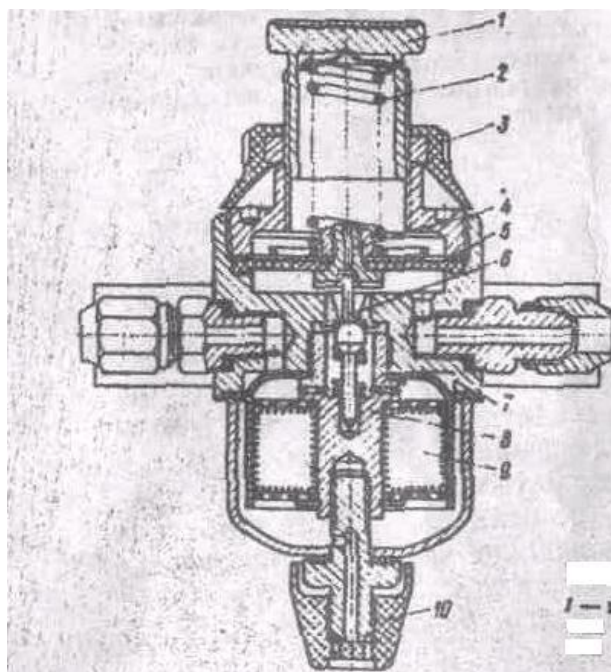
Масса, kg, не более:

с манометром 0,71

без манометра 0,64

Принцип действия

Редуктор — комбинированный малогабаритный прибор, в котором очищается воздух при прохождении через фильтр 9 (рисунок 5), состоит из ультрасупертонкого стеклянного волокна, и регулируется давление воздуха с автоматическим поддержанием его на заданном уровне.



1-колпачок; 2-пружина; 3-контргайка; 4-клапан предохранительный; 5-мембрана; 6-клапан конический; 7-основание; 8-шпindel; 9-фильтр; 10-пробка
Рисунок 6 - Редуктор давления с фильтром РДФ-3

Давление воздуха понижается за счет дросселирования его в зазоре между коническим клапаном 6 и седлом основания 7, который образуется во время работы прибора.

Автоматическое регулирование выходного давления основано на уравнивании им силы сжатия пружины 2 при помощи воздействия на мембрану 5. При нарушении

равновесного состояния, возникающего из-за изменения расхода или входного давления, мембрана прогибается в соответствующую сторону и воздействует на конический клапан, вызывая изменение зазора между ним и седлом. Благодаря этому количество воздуха, поступающего в камеру выходного давления, изменяется так, что оно восстанавливается до прежней величины с небольшим отклонением, обусловленным новым равновесным положением мембраны и соответственно новой силой сжатия пружины.

При чрезмерном повышении выходного давления срабатывает предохранительный клапан 4, выпуская излишек воздуха через отверстие в колпачке 1 в атмосферу.

Задатчика

Назначение

Панель управления типа ПП12.2 в комплекте с вторичными приборами и регуляторами предназначен для реализации одноконтурных и каскадных схем регулирования и управления теплоэнергетическими параметрами технологических процессов.

В одноконтурных схемах регулирования осуществляется дистанционное ручное управление исполнительным механизмом, автоматическое управление с постоянным заданием, автоматическое управление с программным заданием, а также плавный переход с ручного управления на автоматическое и обратно.

В каскадных схемах регулирования осуществляются: дистанционное ручное управление исполнительным механизмом, автоматическое управление с постоянным заданием основного и вспомогательного параметров; автоматическое управление с программным заданием основного и вспомогательного параметров; каскадное управление, а также плавный переход с ручного управления на автоматическое и обратно.

Технические характеристики

Рабочий диапазон изменения входного и выходного аналоговых сигналов (0,02...0,1) Мпа. Класс точности двухстрелочного показывающего манометра 1,5. Предел измерений манометра (0,02...0,1) Мпа.

Давление воздуха питания $(0,14 \pm 0,014)$ Мпа. Расход воздуха в установившемся режиме не менее 4,5 л/мин.

Дальность передачи пневматического сигнала по трубопроводу с внутренним диаметром 6 мм до 300 мм. Габаритные размеры 1605605228 мм. Масса панели не более 4,5 кг.

Непостоянство задания в течение 48 ч не более $\pm 0,0005$ Мпа. Габаритные размеры 415415120 мм. Масса не более 0,35 кг.

Вероятности безотказной работы панели в течение 2000 ч при равна 0,95.

Панель может работать в пожаро- и взрывоопасных помещениях.

Условия эксплуатации: температура окружающего воздуха (5.....50)⁰С; относительная влажность (30....80)%.

Принцип действия

Конструкция панели показана на рисунке 7.

На лицевой панели 1 расположены задатчики ЗД1, ЗД2, манометр МН1, переключатель П2. Реле РВ1-РВ4, клапаны К1, К2 и штуцера внутренних соединений смонтированы на плате 3, в который имеются каналы. С помощью этих каналов и соединительных трубок 6 осуществляется коммутация между элементами. Плата соединяется с дном 4, на котором расположены переключатель П1 и штуцера 5 внешних соединений. Все узлы панели закрыты кожухом 7. Управление работой панели осуществляется с помощью переключателя П2, который выдает командные сигналы на выключающие реле РВ1-РВ4. Последние подключают задатчики ЗД1 и ЗД2 к манометру типа МН1 и внешним штуцерам панели в соответствии с необходимым режимом работы.

При уменьшении натяжки пружины 10 и соответствующем уменьшении давления в камерах Б и Д или при увеличении выходного давления, например вследствие давления питания и при неизменной натяжке пружины 10, увеличивается проходное сечение пары «сопло-заслонка» 5, и давление на выходе задатчика уменьшается.

Задатчик монтируется на щите, пульте или панели прибора .

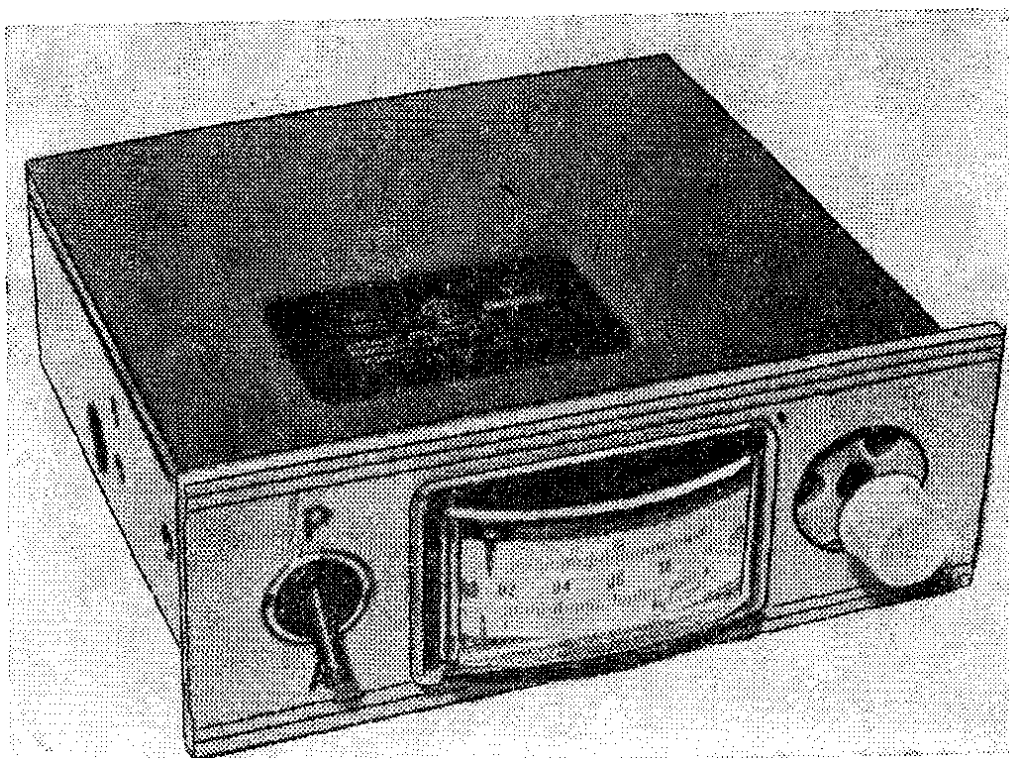


Рисунок 7 - Панель управления пневматическая дистанционная типа ПП12.2

1 – лицевая панель; 2 – колодка; 3 – плата; 4 – дно; 5 – штуцера; 6 – соединительный трубки; 7 - кожух

Ход работы

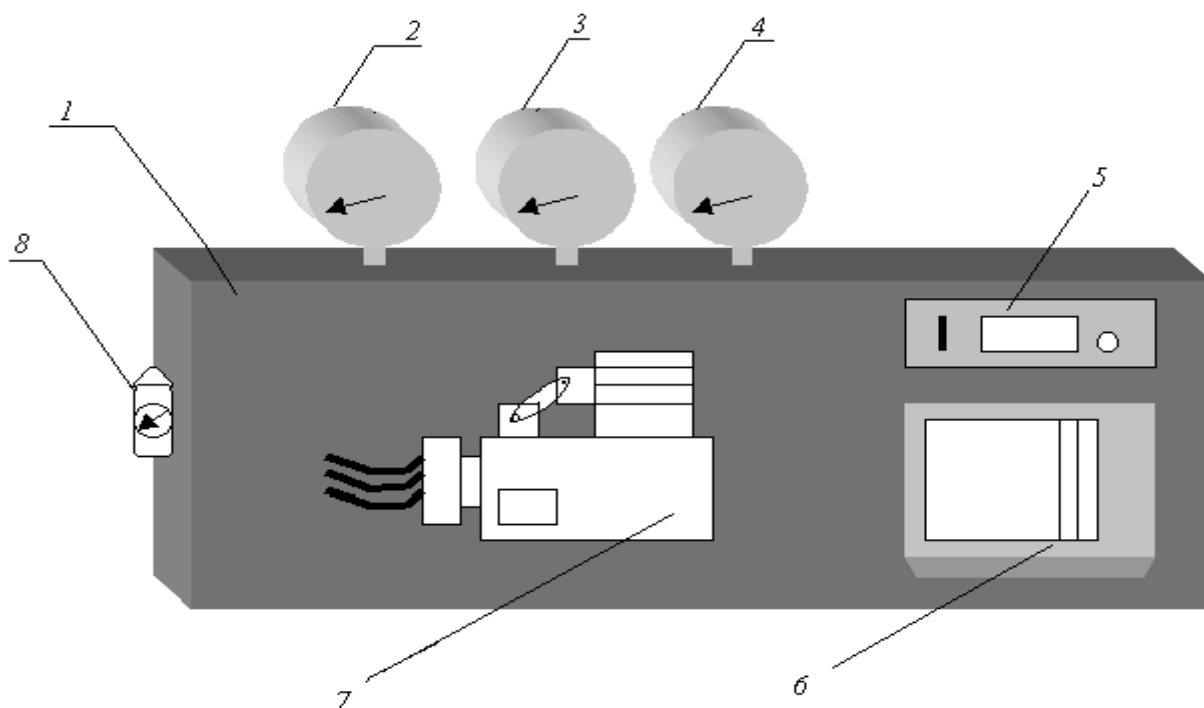
Назначение лабораторного стенда

Лабораторный стенд предназначен для изучения конструкции и регулировки преобразователя давления типа МСП.

Лабораторный стенд представляет собой совокупность измерительных приборов: преобразователя давления МСП, датчика, манометров и вторичного прибора ПКР.2. Все выше перечисленные устройства взаимодействуют между собой по определённой схеме.

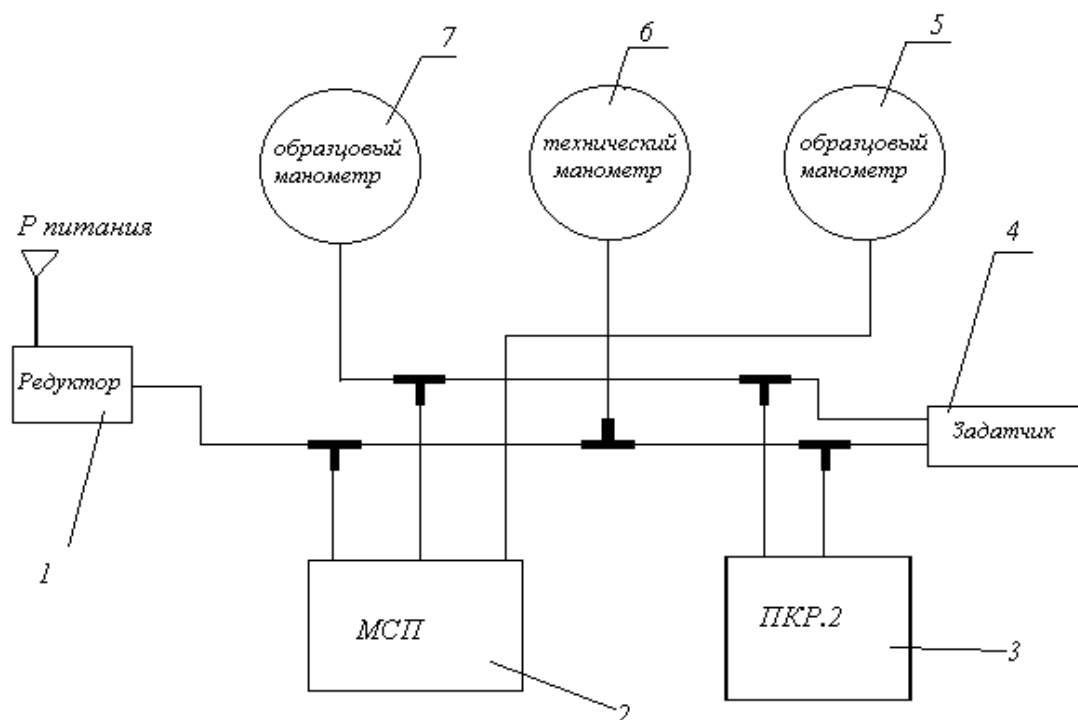
Общий вид лабораторного

стенда



- 1 - Корпус лабораторного стенда;
- 2,4 - Образцовый манометр типа МТИ;
- 3- Технический манометр типа МТП - 160;
- 5 – Датчик типа ПП 12.2;
- 6 – Вторичный прибор ПКР.2;
- 7– Преобразователь давления МСП;
- 8- Редуктор;

Принципиальная пневматическая схема стенда



1 – Редуктор РДФ – 3 - 1

2 – Преобразователь давления с пневматическим
выходным сигналом типа МСП

3 – Вторичный прибор контроля и регистрации ПКР.2

4 – Задатчик типа ПП12.2

5,7 – образцовые манометры типа МТИ

6 – технический типа МТП – 160

Питание приборов осуществляется очищенным от пыли и масла сжатым воздухом при давлении $1,4 \text{ кгс/см}^2 \pm 0,14 \text{ кгс/см}^2$ ($140 \text{ кПа} \pm 14 \text{ кПа}$).

На лабораторный стенд подается сжатый воздух (давление должно быть не ниже 140 кПа), который проходя через редуктор, поступает на: преобразователь давления МСП; вторичный пневматический прибор ПКР.2; технический манометр МТП и на задатчик ПП12.2.

Задатчик ПП12.2 служит для имитации измеряемого давления, подаваемого на вход поверяемого прибора для изменения его в диапазоне от 20-100 кПа.

Воздух с задатчика поступает на преобразователь давления МСП, вторичный пневматический прибор ПКР.2 и на образцовый манометр.

После того как воздух поступил на преобразователь давления МСП с его выхода, воздух подается на образцовый манометр.

Произвели поверку преобразователя давления с пневматическим выходным сигналом типа МСП.

Соединения устройств осуществляется с помощью металлических или пластиковых трубок с внутренним диаметром 4 или 6 мм, и соответственно с наружным 6 или 8 мм, которые присоединяются к устройствам с помощью специальных штуцеров.

Трубки не должны быть перегнуты, помяты и потрескавшиеся.

Для эффективной работы стенда необходимо, чтобы:

- приборы обеспечивали достаточную точность показаний;
- трубные проводки обеспечивали подачу воздуха без потерь;

Лабораторная работа № 4. Изучение конструкции и поверка преобразователя рода сигнала.

1. Назначение, устройство измерительного преобразователя Сапфир 22-ДИ

Измерительный преобразователь предназначен для работы в системах автоматического контроля, регулирования и управления технологическими процессами и обеспечивает непрерывное преобразование значения измеряемого параметра (давления избыточного) в унифицированный токовый выходной сигнал в пределах 0-5 или 0-20 или 4-20 мА постоянного тока.

Преобразователи давления (датчики давления): САПФИР 22Р, малогабаритный САПФИР 22Р ДИ, микропроцессорный САПФИР 22МР предназначены для непрерывного преобразования значения измеряемого параметра давления абсолютного (ДА), избыточного (ДИ), разрежения (ДВ), давления-разрежения (ДИВ), гидростатического (ДГ) и разности давлений (ДД) нейтральных и агрессивных сред в унифицированный токовый выходной сигнал.

Преобразователи разности давлений могут использоваться для преобразования значений уровня жидкости, расхода жидкости или газов, а преобразователи гидростатического давления – для преобразования уровня жидкости в унифицированный токовый выходной сигнал.

Преобразователи имеют исполнение:

- обыкновенное;
- взрывозащищенное (Ех, Вн см. основные технические характеристики);
- для эксплуатации на ОАЭ.

Преобразователи взрывозащищенные предназначены для установки во взрывоопасных зонах помещений и наружных установок согласно ГОСТ Р 51330.13 и другим нормативным документам, регламентирующим применение электрооборудования во

взрывоопасных зонах.

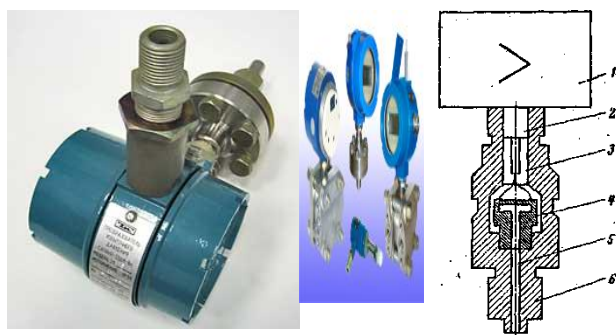
Принцип действия преобразователей основан на воздействии измеряемого давления (разности давления) на мембраны измерительного блока (для моделей 2051, 2144, 2145, 2151, 2152, 2153, 2161, 2162, 2163, 2171, 2172, 2173, 2174, 2351 - на мембрану тензопреобразователя), что вызывает деформацию упругого чувствительного элемента и изменение сопротивления тензорезисторов тензопреобразователя. Измеряемый параметр подаётся в камеру измерительного блока и линейно преобразуется в деформацию чувствительного элемента и изменение электрического сопротивления тензорезисторов тензопреобразователя, размещённого в измерительном блоке.

Электронное устройство измерительного преобразователя преобразует изменение сопротивления в токовый выходной сигнал. Чувствительным элементом тензопреобразователя является пластина из монокристаллического сапфира с кремниевыми плёночными тензорезисторами, прочно соединенная с металлической мембраной тензопреобразователя. Схема преобразователей Сапфир 22-ДИ представлена на рис.1.

Измерительный преобразователь состоит из измерительного блока и электронного устройства. Преобразователи различных параметров имеют унифицированное электронное устройство и отличаются лишь конструкцией измерительного блока.

Мембранный тензопреобразователь 4 размещен внутри корпуса 6. Измеряемое давление подается в камеру 5 воздействует на мембрану тензопреобразователя, вызывая её прогиб и изменения сопротивления тензорезисторов. Полость 3 сообщена с окружающей атмосферой.

Электрический сигнал от тензопреобразователя передается из измерительного блока в электронное устройство 1 по проводам через гермовывод 2.

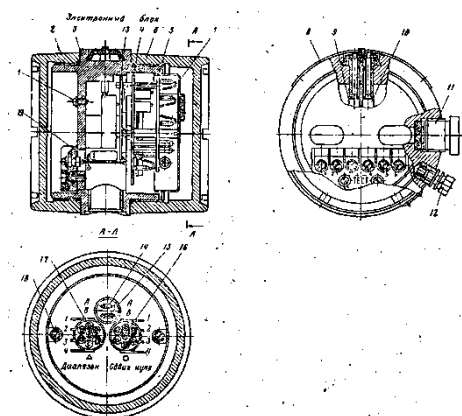


1 - электронное устройство, 2 - гермовывод, 3 - полость сообщения с окружающей атмосферой, 4 - мембранный тензопреобразователь, 5 - рабочая камера, 6 - штуцер.

Рисунок 1 - Схема преобразователей Сапфир-22 ДИ моделей 2151,2161. 2171; Сапфир-22 ДИВ модели 2351

Электронный преобразователь смонтирован на трех платах 4,5,13 (рис.2) размещенных внутри специального корпуса 3. Корпус закрыт крышками 2, 6, уплотненными

резиновыми кольцами. Преобразователь имеет сальниковый кабельный ввод 11 клеммную колодку 19 для подсоединения жил кабеля и болт 12 для заземления корпуса. Корректоры 9 и 10 служат соответственно для плавной настройки «диапазона» и «нуля» выходного сигнала Перемычки 16 и 17 служат для грубой настройки «нуля» выходного сигнала.



1 - винт для подсоединения экрана кабеля; 2,6 - крышка; 3 - корпус; 4,5,13 - платы; 7 - крышки; 8 - табличка; 9 - корректор настройки «диапазона»; 10 - корректор настройки «нуля»; 11 - кабельный ввод; 12 - винт заземления прибора; 14,15 - перемычки для изменения диапазона измерения; 16 - перемычки для грубой настройки «нуля»; 17 - перемычки для грубой настройки «диапазона»; 18 - винт крепления крышки 7; 19 - клеммная колодка.

Рисунок 2 - Электронный блок

Измерительный преобразователь могут работать со вторичными регистрирующими и показывающими приборами, регуляторами и другими устройствами автоматики, работающими от стандартного входного сигнала 0-5 или 0-20 или 4-20 мА постоянного тока.

Электрическое питание преобразователей осуществляется от источника питания постоянного тока напряжением (36±0,72)В 22БП-36.

Технические характеристики представлены в таблице 1 и 2.

Таблица 1 - Основные технические характеристики

Выходной сигнал, мА	4-20; 0-5; 0-20; 20-4; 5-0; 20-0
Верхние пределы измерения, МПа	0,16; 0,25; 0,4; 0,6; 1,0; 1,6; 2,5; 4,0; 6,0; 10,0; 16,0; 25,0; 40,0; 60,0
Погрешность измерения	±0,15 %
Климатическое исполнение	«У» категории 3.1 по ГОСТ 15150-69 (исполнение С3 по ГОСТ 12997-84), но для работы при температуре окружающего воздуха от минус 40 до плюс 70 °С
Тип взрывозащиты	«Специальный» и «Взрывонепроницающая оболочка», маркировка 1ExsdllIBT4

Напряжение питания	24-36 В постоянного тока, от 50 до 400 Гц
Потребляемая мощность	0,85 В·А

Таблица 2 - Контролируемая среда

Тип	жидкие, газообразные, в т.ч. нефть и продукты ее переработки
Предельное давление	25 % от верхнего предела измерения
Температура окружающего воздуха	от -40 до +70 °С

По степени защиты от воздействия пыли и воды преобразователь соответствует исполнению IP-54 по ГОСТ 14254-80.

Материалы деталей, контактирующих с измеряемой средой - сталь 12Х18Н10Т, 36НХТЮ, фторопласт-4.

Пример записи заказа:

Сапфир-22-МПС-Ех-2430-А-01-У2*(-30+50)-0,25-25кПа-16-42-СК-К1/2-В-Р-Ц-HART

Расшифровка обозначения (Сапфир22-1-2-3-4-5-6-7-8-9-10-11-12-13-15-16):

1. Сокращенное наименование модели преобразователя (датчика): Сапфир-22 (22М, 22МТ, 22МП, 22МПС, 22ПС, 22МР, 22Р, 22ЕМ) и др.
2. Исполнение по взрывозащите (Ех, Вн) проставляется только для взрывозащищенного исполнения:
Ех – Искробезопасная электрическая цепь;
Вн – Взрывонепроницаемая оболочка.
3. Модель (ДА-20хх, ДИ-21хх, ДВ-22хх, ДИВ-23хх, ДД-24хх, ДГ-25хх, см. таблицы моделей).
4. При заказе преобразователя, предназначенного для эксплуатации на объектах ОАЭ, следует поставить букву "А", при заказе преобразователя с приработкой 360 часов букву "П".
5. Обозначение исполнения по материалам ("01"-угл. ст., "02"-нерж. и пр., см. таблицу материалов).
6. Обозначение вида климатического исполнения и диапазон температур, отличный от установленных для основных вариантов исполнений (УХЛ3.1, У2, Т3).
7. Предел допускаемой основной погрешности (0,1; 0,15; 0,2; 0,25; 0,5%, см. таблицы моделей).
8. Верхний предел измерений с указанием единицы измерений (кПа, МПа, см. таблицы моделей).
9. Предельно допускаемое рабочее избыточное давление в МПа (см. таблицы моделей).
10. Код выходного сигнала: "05" – 0...5мА; "50" – 5...0мА; "42" – 4...20мА; "24" – 20...4мА.
11. Код скобы и кронштейна – "СК".
12. Код комплекта монтажных частей (К1/2, К1/4, М20, СК, см. таблицу КМЧ,

проставляется только при заказе комплекта.

13. Код вентильного блока **"В"**, указывается согласно примечанию 4.

14. При заказе преобразователя с разъемом следует поставить букву **"Р"**(Разъем).

15. Наличие встроенного цифрового индикатора или выносного индикатора.

16. Наличие **HART**-протокола.

2 Настройка

Перестройка на другой диапазон намерений, смещение «нуля» производится с помощью элементов ступенчатой и плавной настройки переключателей 14 - 17 и корректоров 9, 10 (рис.2).

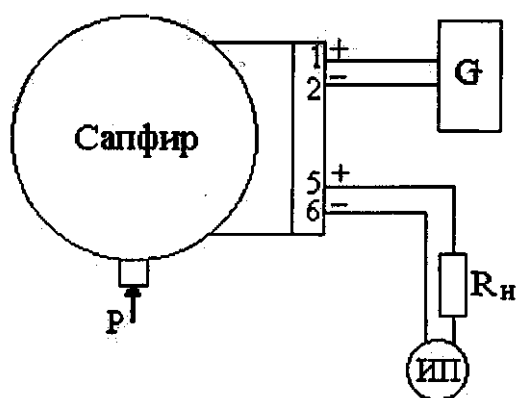
Перестановка переключателей производится в процессе настройки преобразователя.

Перестановку переключателей следует производить при отключенном питании преобразователя.

Преобразователь настраивается в случае перенастройки на другой диапазон измерений, установки нуля со смещением более чем на 10% от диапазона измерений, в случае ремонта.

Настройку преобразователя производите следующим образом:

- установите преобразователь в рабочее положение на грузопоршневой манометр;
- освободите доступ к корректору «нуля»;
- соберите схему указанную на рис.3, и откройте вентили к преобразователю линию для подачи давления;
- снимите крышку 6 и при необходимости перенастройки преобразователя в соответствии с выбранными преподавателем значениями диапазона измерений и смещения нуля установите переключатели 14-17 согласно таблице 3;
- включите питание, выдержите преобразователь во включенном состоянии 30 мин (время прогрева электроники) - преобразователь готов к работе;
- установите значение выходного сигнала, соответствующее нижнему предельному значению измеряемого давления. Для этого подать в преобразователь давление равное нижнему предельному значению, и установить с помощью корректора «нуля» соответствующее ему значение выходного сигнала;
- если корректор «нуля» 10 не обеспечивает достижение заданного значения выходного сигнала, поменять положение переключателя 16 на соответствующее соседнее отключив на это время питание;
- установите значение выходного сигнала, соответствующее верхнему предельному значению измеряемого давления. Для чего увеличить измеряемое давление до верхнего предельного значения и установить с помощью корректора диапазона 9 соответствующее ему предельное значение выходного сигнала. Если корректор диапазона 9 не обеспечивает достижение данного диапазона измерения выходного сигнала, поменять положение переключателя 17 на соответствующее соседнее отключив на это время питание;
- уменьшить измеряемое давление до нижнего предельного значения и с помощью корректора «нуля» вновь установить значение выходного сигнала, соответствующее этому давлению. Для корректировки «нуля» необходимо освободить направляющее отверстие корректора «нуля» 10 от винта. Для корректировки диапазона необходимо снять табличку 8 и освободить направляющее отверстие корректора диапазона 9 от винта;
- выполняют операцию по п.п.6, 7, 8 несколько раз пока предельные значения выходного сигнала не будут установлены с требуемой точностью;
- установить на место крышку 6 и табличку 8.



R_n - резистор нагрузки 1,2 кОм; ИП -милливольтметр; G - источник питания 22-БП-36; P - давление от грузопоршневого манометра.
Рисунок 3 - Схема поверки Сапфир 22-ДИ.

Проверка работоспособности

Перед проведением проверки необходимо выполнить подготовительные работы:

- дифманометр установить в рабочее положение

- проверить герметичность системы(состоящей из соединительных линий и образцового прибора).

При проведении проверки должны выполняться следующие операции
установка начального значения выходного сигнала измерительного преобразователя
проверка герметичности между плюсовой и минусовой камерами измерительного блока
определение основной погрешности и вариации выходного сигнала.
Предел допускаемой основной погрешности САПФИР-22 , выраженный в %
нормирующего значения или диапазона измерения выходного сигнала , численно равен
классу точности поверяемого измерительного преобразователя.

Значение смещения «нуля» выходного сигнала в % от наибольшего диапазона измерений модели	Положение перемычки 16(Рис.2)	Положение перемычки 1 7(Рис.2)					Положение перемычек 14 и 15(рис.6) для преобразователей с возрастающей характеристикой выходного сигнала
		Значение требуемого диапазона измерений в % от наибольшего диапазона измерений модели					
		100	63	40	25	16	
От -10 до +7	1	6	6 или 5	5 или 4	4 или 3	3 или 2	АА и ВВ
От +7 до +24	2	6	6 или 5	5 или 4	4 или 3	3 или 2	

			5				
От +24 до +41	3	-	6 или 5	5 или 4	4 или 3	3 или 2	
От +41 до +58	4	-	-	5 или 4	4 или 3	3 или 2	
От +58 до +75	5 *	-	-	-	4 или 3	3 или 2	
От +75 до +90	6	-	-	-	-	3 или 2	
От -10 до -27	2	6	6 или 5	5 или 4	4 или 3	3 или 2	АВ и АВ
От -27 до -44	3	6	6 или 5	5 или 4	4 или 3	3 или 2	
От -44 до -61	4	6	6 или 5	5 или 4	4 или 3	3 или 2	
От -61 до -78	5	6	6 или 5	5 или 4	4 или 3	3 или 2	
От -78 до -100	6	6	6 или 5	5 или 4	4 или 3	3 или 2	

Таблица 3 - Положение перемычек

Нормирующее значение равно предельному номинальному перепаду давления (для измерительных преобразователей с линейной зависимостью выходного сигнала от измеряемого перепада давления)

Расчетное значение выходных сигналов, в заданном номинальном перепаде давлений для преобразователей с линейной зависимостью выходного сигнала от измеряемого перепада давлений определяют по формуле

-начальное значение выходного сигнала.

-верхнее значение (предельное номинальное) выходного сигнала

-предельный номинальный перепад давлений.

Задавая значения измеряемого давления через каждые 20% диапазона измерения измерьте выходной токовый сигнал, соответствующие этим значениям и занесите в таблицу поверки.

Расчётное значения выходного сигнала соответствующее измеряемому давлению определяется по формуле:

$$I_p = I_n + (I_k - I_o) \times (P/P_{шк})$$

где I_n , i_k - начальное и конечное значения выходного сигнала, мА;

P - значение измеряемого давления, кгс/см (МПа);

$p_{шк}$ - верхний предел измерения (шкала) прибора, кгс/см² (МПа).

Абсолютная погрешность определяется по формуле:

$$\Delta I = I - I_p$$

где ΔI - абсолютная погрешность, мА;

I - значение выходное сигнала соответствующее измеряемому давлению P , мА

Таблица 4 - Результаты поверки

Значение измеряемой величины кгс/см ²	Показания образцового прибора кгс/см ²		Абсолютная погрешность		Вариация
	прямой ход	обратный ход	прямой ход	обратный ход	

Лабораторная работа № 5. Изучение схемы световой и звуковой сигнализации.

Простая схема световой и звуковой сигнализации

Схема общей сигнализации, показанная на рисунке 1 содержит минимальное количество коммутационных элементов.

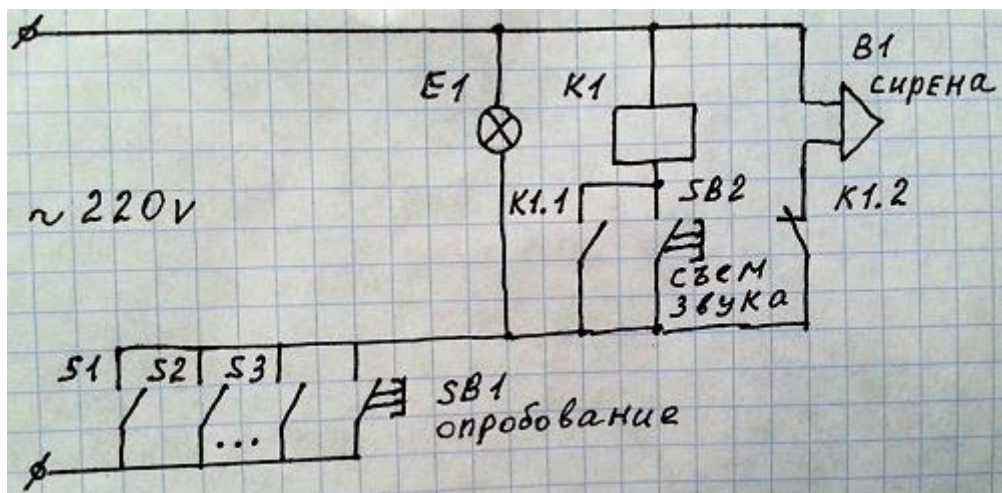


Рисунок 1. Простая схема световой и звуковой сигнализации КИП и А

S1...Si – нормально разомкнутые контакты реле приборов, замыкающиеся при достижении уставок приборов значений, при которых должна срабатывать сигнализация.

SB1 – Кнопка «Опробование». Имитирует срабатывание сигнализации. При нажатии загорается лампочка **E1** и слышен звук сирены / звонка **B1**.

SB2 – Кнопка «Съем звука». Служит для отключения звука сигнализации. Световая сигнализация при этом продолжает работать.

K1.1 – нормально разомкнутый контакт реле **K1**.

K1.2 – нормально замкнутый контакт реле **K1**.

K1 – электромагнитное реле / пускатель, с рабочим напряжением 220 вольт переменного тока на катушке, с одним нормально замкнутым и одним нормально разомкнутым контактами.

E1 – лампа накаливания 220 вольт – световая сигнализация.

B1 – сирена / звонок, с рабочим напряжением 220 вольт переменного тока – звуковая сигнализация.

Принцип действия сигнализации

Контакты реле приборов **S1...Si** (их может быть неограниченное количество), запараллелены между собой и с кнопкой «Опробование» сигнализации.

При замыкании любого из них загорается лампочка «**E1**» световой сигнализации, а также через нормально замкнутый контакт **K1.2** реле **K1**, напряжение 220 вольт подается на сирену / звонок звуковой сигнализации.

Если сигнализация включена, а нужно отключить звук, - нажатием кнопки «Съем звука», напряжение подается на катушку реле **K1**. При его срабатывании размыкается цепь питания сирены (контакт **K1.2**), звук отключается. Само же реле подхватывается через контакт **K1.1**.

Если контакт прибора, вызвавший включение сигнализации размыкается, то соответственно выключается сигнализация – и световая, и звуковая. Реле **K1** приводится в исходное состояние.

Достоинства - Простота

Недостатки - При использовании лампочки и сирены большой мощности, через коммутационные контакты $S1...Si$ реле приборов может проходить большой ток, что может привести к их подгоранию и выходу из строя. Поэтому, при реализации данной схемы необходимо следить за тем, чтобы суммарный ток лампочки и сирены не превышал предельно допустимый паспортный ток для выходных устройств (реле) приборов.

Буферизированная схема световой и звуковой сигнализации

Схема общей сигнализации, представленная на рисунке 2 по принципу действия соответствует схеме сигнализации представленной выше.

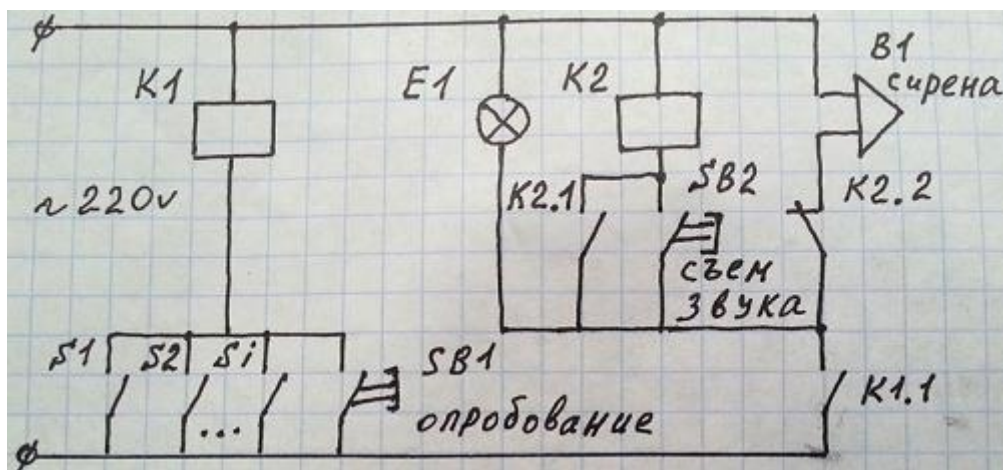


Рисунок 2. Буферизированная схема световой и звуковой сигнализации

Но здесь добавлено промежуточное буферное реле **K1** (~220 вольт), исключающее выход из строя контактов реле выходных устройств приборов.

При замыкании контакта реле выходных устройств приборов, через катушку реле / пускателя **K1** проходит сравнительно небольшой ток, в большинстве случаев не превышающий предельно-допустимый паспортный. В то же время замыкающий, силовой контакт этого реле / пускателя, может коммутировать достаточно большую мощность для подключения лампочки и сирены свето-звуковой сигнализации.

Триггерная схема световой и звуковой сигнализации

Предыдущие две схемы сигнализации работают таким образом, что при превышении каких либо уставок загорается лампочка и включается звук, а при переходе в нормальный режим, - и свет и сирена отключаются.

В некоторых случаях может быть необходимо включении сигнализации на длительное время даже при кратковременном превышении уставок технологических параметров.

Схема такой сигнализации изображена на рисунке 3.

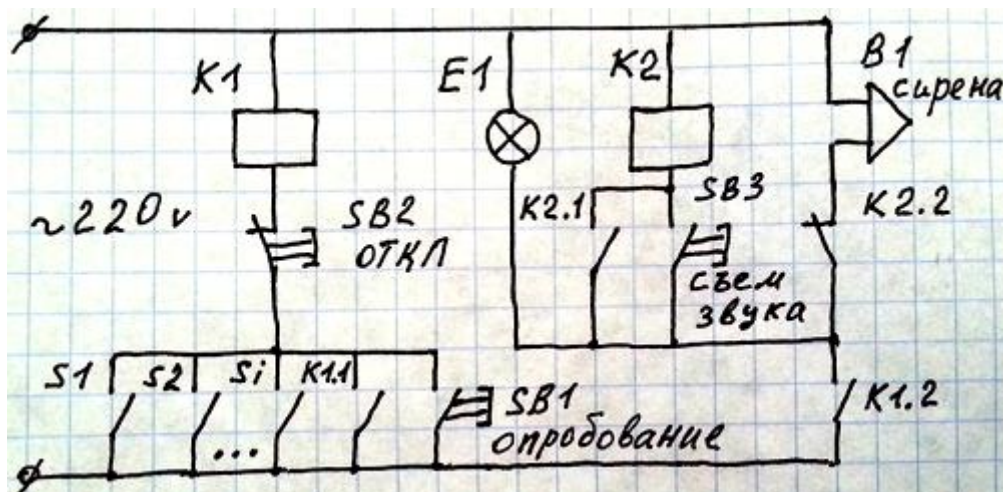


Рисунок 3. Триггерная схема световой и звуковой сигнализации

Принцип действия аналогичен предыдущей схеме, за исключением того, что в реле **K1** добавлен нормально разомкнутый контакт самоподхвата **K1.1** и кнопка сброса (выключения) сигнализации **SB2**.

Даже при кратковременном превышении параметра уставок приборов (замыкании контактов **S1...Si**), реле **K1** работает и блокируется контактом **K1.1**.

Сбросить его в исходное состояние (выключить сигнализацию) можно разорвав цепь питания его катушки вручную кнопкой **SB2**.

Схема световой и звуковой сигнализации на реле РТД12

Схема звуковой сигнализации на реле РТД12 показана на рисунке 4.

Если предыдущие схемы идеально подходят реализации для одноканальной сигнализации, то при подключении нескольких приборов не всегда может быть удобно определять каким именно прибором вызвано включение сигнализации. Схема, приведенная ниже работает таким образом, что при срабатывании сигнализации от неограниченного числа приборов включается общая звуковая сигнализация – сирена и загорается одна или несколько лампочек, указывающая на канал (прибор, устройство) от которого сработала сигнализация.

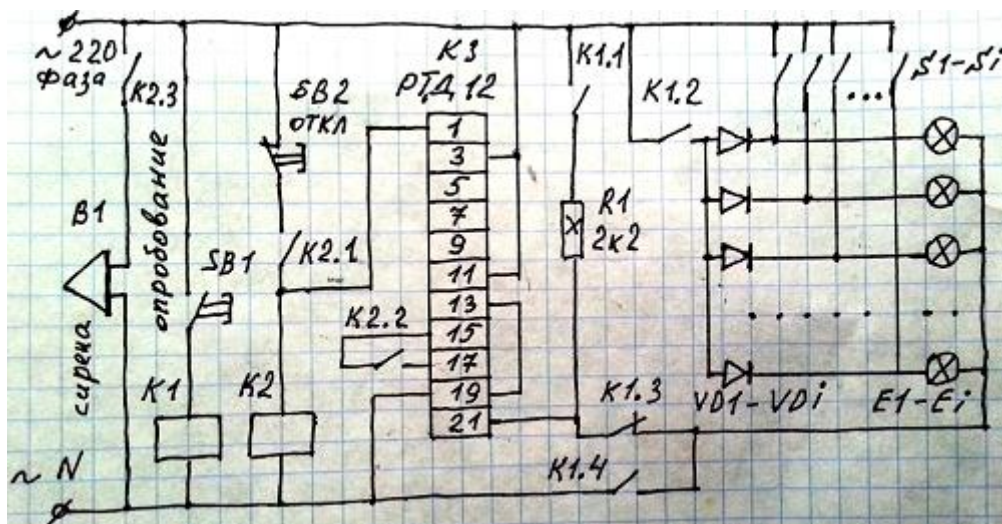


Рисунок 4. Схема световой и звуковой сигнализации на реле РТД12

K1 – реле опробования сигнализации . Напряжение катушки = ~220 вольт.
K2 – реле включения / отключения звуковой сигнализации. Напряжение катушки = ~220 вольт.
B1 – звонок / сирена ~220 вольт.
S1...Si – контакты реле уставок приборов (может быть неограниченное количество)
E1...E2 – лампочки накаливания ~220 вольт, 10 Вт
VD1...VDi - диоды типа Д226Г или более современные, на напряжение не менее 400 вольт.
SB1, SB2 – кнопки «опробование сигнализации» и «съем звука».
R1 – резистор 2.2 кОм, мощностью не менее 10 Вт.

Особенность схемы заключается в том, что при замыкании одного из контактов реле выходных устройств приборов, фаза ~220 Вольт подается через соответствующую лампочку канала на вход реле **РТД12**, вызывая его включение. При этом лампочка горит и включается звуковая сигнализация.

Если лампочка неисправна, то не происходит включение реле, и соответственно не сработает ни звуковая, ни световая сигнализация. Чтобы избежать этого, требуется периодически проверять работу сигнализации, исправность лампочек. Для этих целей предназначена кнопка **SB1** - «опробование сигнализации». При ее нажатии срабатывает реле **K1**, загораются все исправные лампы сигнализации, а также включается сирена / звонок звуковой сигнализации.

Отключение звука производится кнопкой **SB2** - «съем звука».

Тема 2.2. Основы теории автоматического регулирования

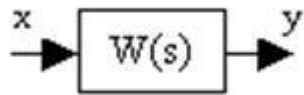
Лабораторная работа № 1. Построение структурных схем соединения звеньев.

Систему автоматического управления можно рассматривать как комбинацию типовых динамических звеньев. Изображение системы управления в виде совокупности типовых и нетиповых динамических звеньев с указанием связей между ними носит название структурной

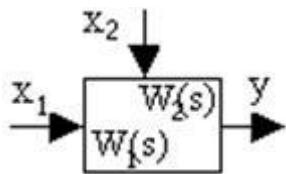
схемы системы. Звено в этом случае выступает как элементарная структурная единица, преобразователь информации.

Структурные схемы состоят из отдельных структурных элементов. Основными элементами структурных схем являются следующие.

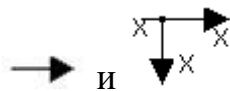
1. Звено с одним входом и одним выходом: $Y(s)=W(s)X(s)$.



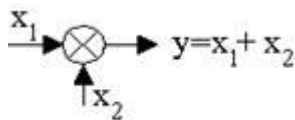
2. Звено с двумя входами и одним выходом (около каждого входа записывается своя передаточная функция): $Y(s)=W_1(s)X_1(s)+W_2(s)X_2(s)$



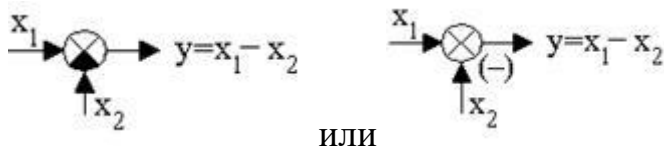
3. Линия связи и узел (разветвление), стрелка показывает направление передачи информации.



4. Сумматор.



5. Элемент сравнения.



В системах управления встречаются три вида соединений звеньев: **последовательное, параллельное и соединение по схеме с обратной связью.**

Последовательное соединение звеньев изображено на рис.1, такое соединение характеризуется тем, что выход предыдущего звена подается на вход последующего.

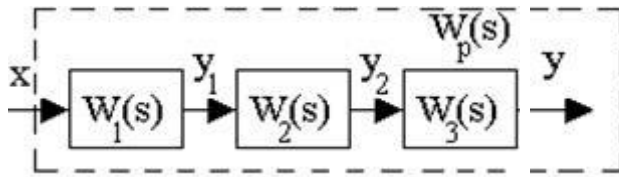


Рис. 1. Последовательное соединение звеньев

Выходная величина последовательно соединенных звеньев определяется $Y(s) = W_3(s)Y_2(s) = \dots = W_1(s)W_2(s)W_3(s)X(s)$.

Откуда результирующая передаточная функция равняется

$$W_p(s) = W_1(s)W_2(s)W_3(s)$$

Следовательно, в общем случае можно записать

$$W_p(s) = \prod_{i=1}^n W_i(s), \quad (3.51)$$

где n - число включенных последовательно звеньев.

Таким образом, результирующая передаточная функция последовательно соединенных звеньев равна произведению передаточных функций составляющих звеньев.

Параллельное соединение звеньев изображено на рис.2, такое соединение характеризуется тем, что на входы всех звеньев подается одно и то же входное воздействие, а выходная величина определяется суммой выходных величин отдельных звеньев.

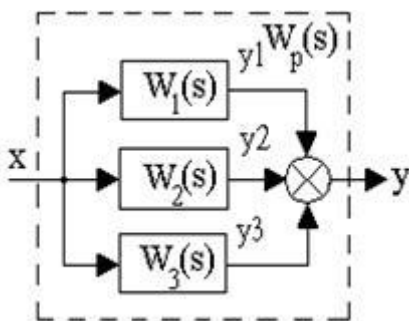


Рис. 2. Параллельное соединение звеньев

Выходная величина параллельно соединенных звеньев определяется $y=y_1+y_2+y_3$, т.е.

$$Y(s) = W_1(s)X(s) + W_2(s)X(s) + W_3(s)X(s)$$

Тогда
$$W_p(s) = W_1(s) + W_2(s) + W_3(s)$$

В общем случае

$$W_p(s) = \sum_{i=1}^n W_i(s), \quad (3.52)$$

где n - число включенных параллельно звеньев.

Таким образом, результирующая передаточная функция параллельно соединенных звеньев равна сумме передаточных функций составляющих звеньев.

Обратная связь. Такое соединение звеньев изображено на рис.3.12, оно характеризуется тем, что выходной сигнал звена подается на его вход.

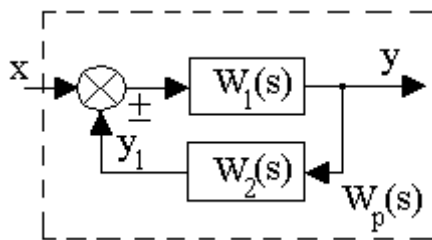


Рис. 3.. Соединение звеньев по схеме с обратной связью

Обратная связь может быть положительной (ПОС), если сигнал y_1 , снимаемый с выхода второго звена, суммируется с сигналом x на входе, и отрицательной (ООС), если y_1 вычитается. Кроме того, обратные связи могут быть жесткими и гибкими. Связь называется гибкой, если передаточная функция $W_2(s)$ в установившемся режиме равна нулю.

Для определения результирующей передаточной функции такой комбинации звеньев запишем очевидные соотношения:

$$\begin{cases} Y(s) = W_1(s) \cdot [X(s) \pm Y_1(s)] \\ Y_1(s) = W_2(s)Y(s) \end{cases},$$

где знак “+” относится к положительной, а знак “-” - к отрицательной обратной связи.

Откуда результирующая передаточная функция обратной связи имеет вид

$$W_p(s) = \frac{W_1(s)}{1 \pm W_2(s)W_1(s)}, \quad (3.53)$$

где знак “+” соответствует ООС, знак “-” - ПОС.

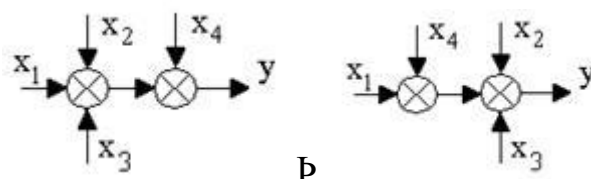
В общем случае, сложная цепь динамических звеньев, образующих систему управления, включает в себя комбинации всех трех рассмотренных случаев, т.е. представляет собой смешанное соединение звеньев. Пользуясь выражениями, можно найти общую результирующую передаточную функцию смешанного соединения звеньев.

В тех случаях, когда структурная схема системы оказывается сложной и содержит перекрестные связи, ее упрощают и сводят к простейшему эквивалентному виду, пользуясь правилами преобразования структурных схем.

Основные правила эквивалентного преобразования структурных схем.

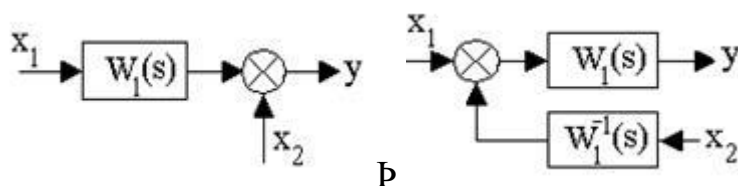
1. Перенос сумматора:

а)



$$y = x_1 + x_2 + x_3 + x_4 \quad y = x_1 + x_4 + x_2 + x_3$$

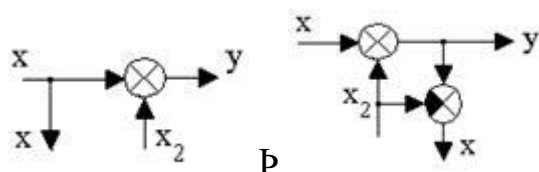
б)



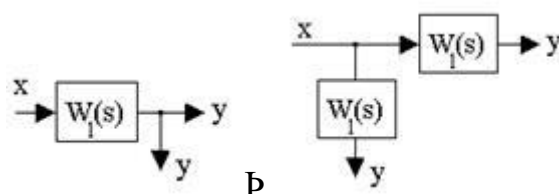
$$y = x_1 W_1(s) + x_2 y = [x_1 + x_2 W_1^{-1}(s)] W_1(s) = x_1 W_1(s) + x_2$$

2. Перенос узла:

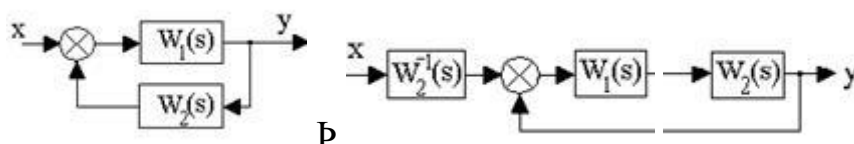
а)



б)



3. Преобразование к единичной обратной связи.

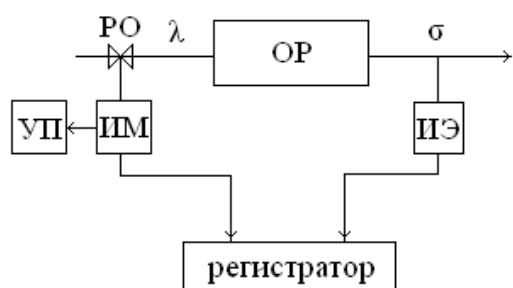


$$W_P(s) = \frac{W_1(s)}{1 \pm W_2(s)W_1(s)} \quad W_P(s) = \frac{W_1(s)W_2(s)}{1 \pm W_1(s)W_2(s)} \cdot \frac{1}{W_2(s)}$$

Лабораторная работа № 2. Экспериментальное определение временной характеристики ОР и получение дифференциального уравнения его движения.

а) Подготовка к эксперименту включает анализ технич. проц. как ОР и подготовку к эксперименту.

Изучается технологическая схема процесса, конструкция аппаратов, технологический регламент процесса. Назначаются регулируемые величины, выбираются регулирующие воздействия, анализируются возмущения. Составляется структурная схема объекта.



Примерная схема эксперимента по определению переходных характеристик объекта (характеристик разгона) имеет вид.

РО – регулирующий орган

ОР – объект регулирования

ИЭ – измер. элемент

ИМ – исполн. механизм

УП – указатель положения РО

Т.о., разработка схемы эксперимента включает решение трех задач:

а) измерение σ

б) измерение λ

в) регистрация σ и λ

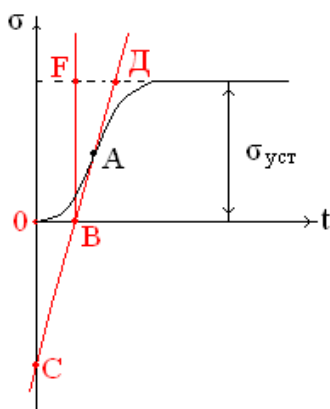
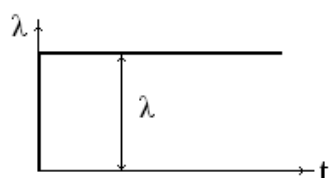
Регулирующим воздействием является обычно расход вещества (топлива, пара и т.д.), который, как правило, не измеряется. Поэтому чаще всего в качестве регулирующего воздействия принимают положение регулирующего органа (в % хода РО: 0% – положение «закрыто», 100% – положение «открыто»). Величину σ желательно измерять тем же датчиком, что и в САР. Инерционность ИЭ должно быть меньше инерционности ОР.

б) Проведение эксперимента.

Перед нанесением возмущения регулируемая величина должна быть стабилизирована затем наносится возмущение.

в) Аппроксимация переходных характеристик ОР методом спрямленных характеристик.

Аппроксимация – нахождение аналитического выражения с заданной точностью.



Метод заключается в том, что уравнение объекта любого порядка представляется уравнением объекта первого порядка с запаздыванием.

$$\begin{aligned} \tau &= OB \\ T &= FD \\ K &= \frac{\sigma_{уст}}{\lambda_{уст}} \end{aligned}$$

$$\varepsilon = \frac{d\sigma}{dt} / \lambda = \frac{OC}{OB} / \lambda = \frac{OC}{\tau \lambda_{уст}}$$

$$\rho = \frac{\lambda_{уст}}{\sigma_{уст}}$$

$$W_{об}(P) = \frac{K}{TP + 1} e^{-\tau P} = \frac{\varepsilon}{P + \varepsilon \rho} e^{-\tau P}$$

§3. Автоматические регуляторы. Законы регулирования. Выбор настроек регулятора.

Автоматическим регулятором называется совокупность элементов, служащих для регулирования технологических процессов.

Функциональная схема замкнутой системы автоматического регулирования, работающей по отклонению регулируемой величины изображена на рисунке 1.

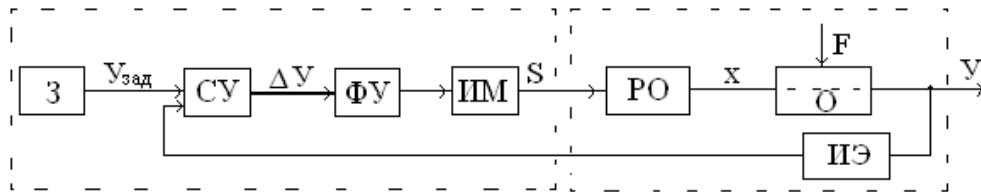


Рис.1. Функциональная схема системы автоматического регулирования.

З – задатчик регулируемой величины, служит для установки ее заданного значения $U_{зад}$; СУ – сравнивающее устройство, вырабатывает сигнал рассогласования $\Delta U = U_{зад} - U$; ФУ – формирующее устройство – служит для формирования закона регулирования; ИМ – исполнительный механизм, приводит в действие РО; РО – регулирующий орган, служит для изменения регулирующего воздействия x ; О – собственно объект регулирования; ИЭ – измерительный элемент, для измерения регулируемой величины U и преобразования ее в унифицированный сигнал.

Регулирующий орган (вместе с приводом, если таковой имеется) принято относить к объекту регулирования. Измерительный элемент можно относить как к объекту, так и к регулятору. В тех случаях, когда измерительный элемент используется для получения временной характеристики, его относят к объекту.

Измерительная система регулятора состоит из чувствительного элемента, непосредственно реагирующего на измеряемую величину, и преобразователя (преобразующего выходной сигнал чувствительного элемента в унифицированный сигнал). Выходной сигнал измерительного элемента поступает на сравнивающее устройство, куда также поступает сигнал от задатчика. Рассогласование ΔU поступает на формирующее устройство, представляющее в общем случае усилитель с последовательно или параллельно включенными корректирующими звеньями. Формирующее устройство предназначено для выработки управляющего сигнала, поступающего на исполнительный механизм. Исполнительный механизм воздействует на регулирующий орган, отбрасывая рассогласование ΔU до его устранения.

Упрощенно схему автоматического регулирования изображают как показано на рисунке 2.

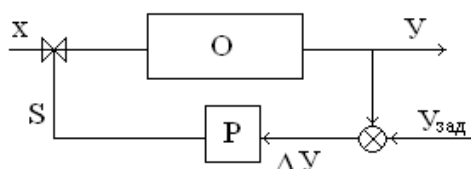


Рис.2. Упрощенная схема системы автоматического регулирования.

Под символами О и Р понимаются совокупности элементов, объединенных на рисунке 1 штриховыми контурами.

По потреблению энергии для перестановки регулирующего органа регуляторы делятся на регуляторы прямого и косвенного действия. В регуляторах прямого действия для перестановки регулирующего органа используется энергия самой регулирующей среды. Регуляторы прямого действия просты, дешевы, однако не обеспечивают высокого качества регулирования. Недостатками регуляторов прямого действия являются трудности реализации различных законов регулирования и незначительная мощность на выходе.

В регуляторах косвенного действия для перестановки регулирующего органа используется энергия внешнего источника.

Регуляторы косвенного действия по виду потребляемой энергии делятся на электрические, пневматические, гидравлические и комбинированные. Выбор того или иного типа регулятора диктуется условиями работы и некоторыми специальными требованиями (быстродействие, надежность, долговечность и т.д.).

Линейные регуляторы можно классифицировать также по закону регулирования. Под законом регулирования понимают зависимость выходной величины регулятора от входной:

$$x = f(\Delta U); \Delta U = U - U_{зад} \quad (1)$$

По закону регулирования регуляторы делятся на пропорциональные, интегральные, пропорционально-интегральные, пропорционально-дифференциальные, пропорционально-интегрально-дифференциальные.

В пропорциональных регуляторах регулирующее воздействие пропорционально рассогласованию:

$$x = K_p \Delta U \quad (2)$$

где K_p – коэффициент передачи регулятора. Передаточная функция такого регулятора.

$$W_p(P) = K_p \quad (3)$$

Пропорциональный регулятор является безынерционным звеном, поэтому имеет хорошие динамические свойства, т.к. не вносит отрицательного фазового сдвига в систему. Недостатком пропорционального регулятора является наличие статической ошибки. При единичном регулирующем воздействии $x=1$ абсолютная статическая ошибка (ΔU) определяется как

$$\Delta U = \frac{1}{K_p} \quad (4)$$

Удобнее пользоваться относительной ошибкой δ .

$$\delta = \frac{\Delta U}{U_{зад}} \quad (5)$$

Величину δ показывают еще статизмом регулирования или диапазоном дросселирования.

Пропорциональные регуляторы применяют в тех случаях, когда допустима статическая ошибка или при автоматизации малоинерционных объектов регулирования, когда значение K_p может быть выбрано достаточно большим с целью уменьшения статической ошибки.

Интегральные (астатические) регуляторы имеют следующий закон регулирования

$$x = K_0 \int_0^t \Delta y dt, \quad (6)$$

т.е. регулирующее воздействие пропорционально интегралу от рассогласования.

Величина $K_0 = \frac{dx}{dt} / dy$ называется приведенной скоростью регулирования, т.к. определяет скорость изменения регулирующего воздействия, приходящегося на единицу рассогласования. Передаточная функция интегрального регулятора

$$W_p(P) = \frac{K_0}{P} \quad (7)$$

Достоинством астатического регулятора является нулевая статическая ошибка.

$$\Delta y = \frac{dx/dt}{K_0} \quad (8)$$

$$= \frac{dx}{dt} = 0$$

В статике $\frac{dx}{dt} = 0$, следовательно $\Delta y = 0$. Однако система с таким регулятором имеет плохие динамические свойства, поскольку интегральный регулятор вносит в систему

отрицательный сдвиг по фазе $-\frac{\pi}{2}$, что резко уменьшает запас устойчивости САУ. Этот недостаток ограничивает применение астатических регуляторов. Они могут применяться при автоматизации только безинерционных объектов. Системы с таким регулятором и объектом без самовывравнивания являются структурно неустойчивыми, т.е. неустойчивыми при любых настройках регулятора.

В пропорционально-интегральных регуляторах регулирующее воздействие представляет сумму двух составляющих, пропорциональных отклонению и интегралу от отклонения, т.е.

$$x = K_p \Delta y + K_0 \int_0^t \Delta y dt \quad (9)$$

Передаточная функция регулятора

$$W_p(P) = K_p + \frac{K_0}{P} \quad (10)$$

Анализ закона регулирования пропорционально-интегрального регулятора показывает, что он вносит в систему гораздо меньший фазовый сдвиг, чем астатический регулятор. Системы с пропорционально-интегральным регулятором имеют нулевую статическую ошибку при сравнительно неплохих динамических свойствах. Эти обстоятельства обеспечивают пропорционально-избирательным регуляторам наиболее широкое применение.

В пропорционально-дифференциальных (ПД-регуляторах) к пропорциональной составляющей регулирующего воздействия добавляется воздействие по производственной от отклонения ΔY .

$$\lambda = K_p \Delta Y + K_2 \frac{d(\Delta Y)}{dt} \quad (11)$$

Тогда передаточная функция регулятора

$$W_p(P) = K_p + K_2 P \quad (11)$$

В статике передаточная функция ПД-регулятора аналогична передаточной функции П-регулятора, следовательно, системы с пропорционально-дифференциальным регулятором также присуща статическая ошибка. Пропорционально-дифференциальный регулятор вносит в систему положительный фазовый сдвиг, увеличивая запас устойчивости. Поэтому системы с ПД-регулятором имеют лучшие динамические свойства по сравнению с системами с П-регулятором. Однако наличие статической ошибки является недостатком этого регулятора.

Регулирующее воздействие пропорционально-интегрально-дифференциального регулятора представляет сумму пропорциональной, интегральной и дифференциальной составляющих.

$$x = K_p \Delta Y + K_0 \int_0^t \Delta Y dt + K_2 \frac{d(\Delta Y)}{dt} \quad (12)$$

Аналитические характеристики ПИД-регулятора имеют вид

$$W_p(P) = K_p + \frac{K_0}{P} + K_2 P \quad (13)$$

$$W(j\omega) = K_1 + j \left[\omega K_2 - \frac{K_2}{\omega} \right] = \sqrt{K_1^2 + \left[\omega K_2 - \frac{K_0}{\omega} \right]^2} e^{j \arctg \frac{\omega^2 K_2 - K_0}{\omega K_1}} \quad (14)$$

ПИД-регуляторы совмещают в себе все достоинства вышеперечисленных регуляторов: нулевую статическую ошибку и очень хорошие динамические свойства. Однако вследствие своей сложности ПИД-регуляторы применяются при автоматизации производства сравнительно редко.

При выборе закона регулирования нужно руководствоваться следующими соображениями.

1. Если не допускается статическая ошибка, закон регулирования должен содержать И составляющую, т.е. должны использоваться И, ПИ, ПИД-регуляторы.
2. По динамическим свойствам регуляторы располагаются в следующей последовательности ПД, ПИД, П, ПИ, И. это объясняется величиной запаса устойчивости, зависящей от фазочастотных характеристик регулятора. (рис.3.)

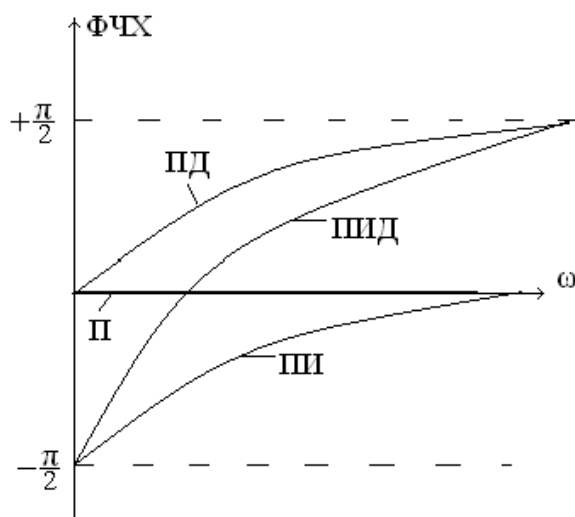


Рис. 3.

Фазочастотные характеристики регуляторов с различными законами регулирования.

3. Реализация Д-составляющей осуществляется приближенно. Кроме того, наличие Д-составляющей усложняет схему регулятора, повышает его стоимость и снижает его помехоустойчивость. Поэтому регуляторы с Д-составляющей (ПД и ПИД) находят ограниченное применение.

Качество регулирования оценивается с помощью показателей, характеризующих

форму кривой переходного процесса в замкнутой системе автоматического регулирования.

Лабораторная работа № 3. Изучение конструкции и расчет характеристик элементов УСЭППА.

Универсальная система элементов промышленной пневмоавтоматики (УСЭППА) представляет собой набор отдельных конструктивных единиц – элементов, каждый из которых может выполнять лишь простейшую функцию преобразования сигналов в общей схеме всего устройства. В их числе постоянные и регулируемые пневмосопротивления, пневмоёмкости, пневмореле, пневмоусилители и т.п. На практике применяют комплекс средств пневмоавтоматики, построенных на элементах УСЭППА, получивших наименование системы «Старт». В состав её входит несколько модификаций пневматических регуляторов, реализующих различные законы регулирования, вторичные приборы, а также приборы, реализующие простейшие вычислительные функции.

Пневмоэлементы УСЭППА монтируются на платах, содержащих коммуникационные каналы – пневмопровода и монтажные изделия. Платы – шасси приборов изготавливаются склеиванием трёх пластин из органического стекла. На обеих сторонах средней пластины нанесены углубления, рисунок которых соответствует нужной схеме соединения элементов УСЭППА и принятому их расположению. Элементы УСЭППА соединяются с каналами в коммутационной плате с помощью специальных «ножек», образующих монтажный цоколь элемента и в то же время составляющих подвод и отвод воздуха к нему.

При изображении элементов на схемах приняты следующие условные обозначения.

Постоянный дроссель предназначен для использования в качестве нерегулируемого сопротивления.

Таблица 1. Условные обозначения элементов пневмоавтоматики.

Обозначение	Наименование	Обозначение	Наименование
	Входной сигнал		Дроссель постоянный
	Выходной сигнал		Дроссель переменный
	Линия питания		Пневмоёмкость
	Соединение с атмосферой		Камера, давление в которой $P = 30\% P_{\text{пит}}$
	Узел «сопло – заслонка»		Камера, давление в которой $P = 80\% P_{\text{пит}}$
	Мембрана с жёстким центром		

Переменный дроссель используется в качестве переменного сопротивления.

Пневмоёмкости предназначены для создания инерционных звеньев в пневматических цепях.

Дроссельный сумматор предназначен для суммирования двух пневматических сигналов.

Повторитель (следящая камера) с постоянным дросселем обычно используется для повторения изменения входного сигнала.

Он состоит (см. рис.1) из входной Б и выходной А камер, разделённых гибкой мембраной, жёсткий центр которой служит заслонкой сопла. Повторитель действует по принципу компенсации сил. Входной пневматический сигнал поступает в камеру Б и развивает на мембране усилие, направленное в низ. В камеру А через постоянный дроссель в комплекте с которым работает повторитель, непрерывно подаётся воздух по линии питания. Часть воздуха из камеры А через зазор между заслонкой и соплом выпускается в атмосферу. В камере А устанавливается давление, промежуточное между давлением питания и атмосферным. Это давление, которое является выходным сигналом элемента, развивает на мембране усилие, направленное вверх. Оба противоположно направленные на мембрану усилия непрерывно сравниваются. При нарушении равновесия, например при увеличении входного давления, мембрана прикроет сопло и уменьшит расход воздуха в атмосферу. Давление в камере А (выходное) увеличится, и равновесие восстановится

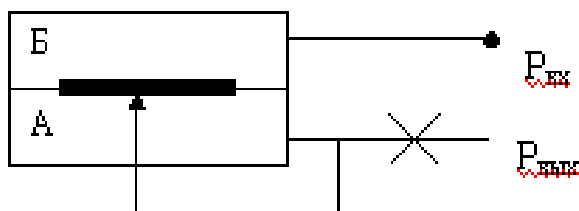


Рис.1. Повторитель.

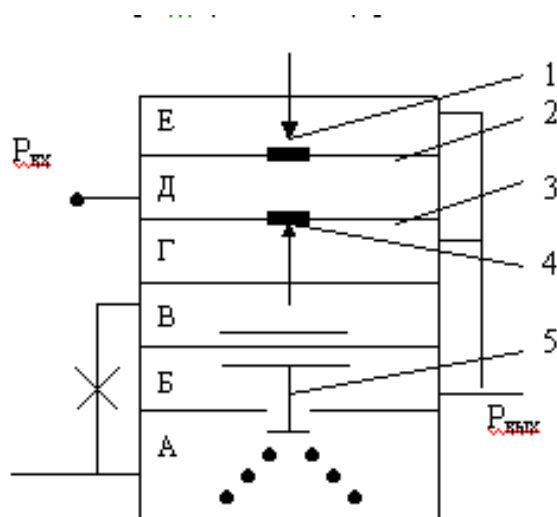


Рис.2. Усилитель мощности.

Усилитель мощности (рис.2) предназначен для повторения входного пневматического сигнала и усиления его по мощности. Входное давление поступает в камеру Д усилителя. Давление питания проходит в камеру А и через постоянное сопротивление в камеру В. При отсутствии входного сигнала воздух питания проходит из камеры В через сопло 4 в камеру Г и далее через камеру Е и сопло 1 в атмосферу.

При увеличении входного давления мембрана 2 закрывает сопло 1, а мембрана 3 закрывает сопло 4. Давление в камере В повышается, клапан 5 открывается, и давление в камере Б и на выходе увеличивается. Одновременно под действием обратной связи увеличивается давление в камерах Г и Е. Сопла 1 и 3 приоткрываются, и воздух питания снова проходит через камеры В, Г и Е в атмосферу. Давление в камере В уменьшается, и клапан закрывается. На выходе устанавливается давление $P_{\text{вых}}$, равное входному $P_{\text{вх}}$. С уменьшением входного давления мембрана 2 открывает сопло 1, а мембрана 3 открывает сопло 4. Часть воздуха из выходной камеры Б проходит через сопло 1 в атмосферу, и давление на выходе понижается. Используя дополнительный источник питания и управляющий клапан 5 большого сечения, усилитель обеспечивает усиление выходного сигнала по мощности.

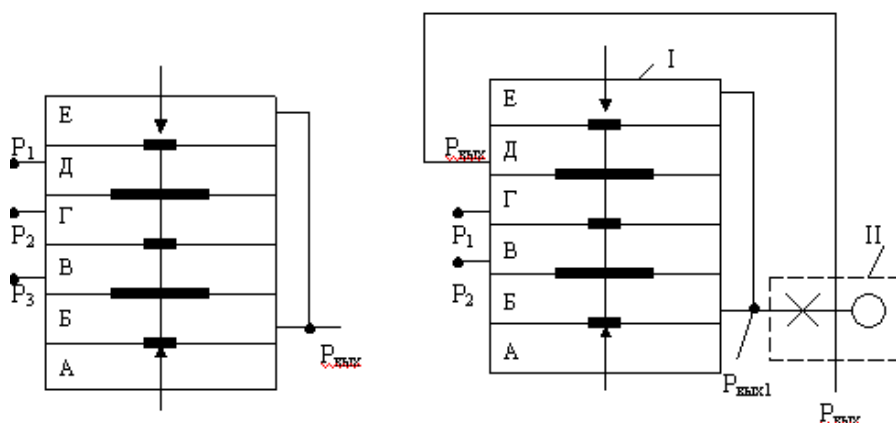


Рис.3. Пятимембранный элемент сравнения.

Рис.4 Интегрирующее звено.

Элемент сравнения предназначен для алгебраического суммирования пневматических сигналов. Бывает трёхмембранный и пятимембранный.

В конструктивном отношении он представляет собой набор металлических шайб, разделённых двумя мембранами. Жёсткие центры всех мембран соединены общим штоком, концы которого служат заслонками, управляющими скоростью истечения воздуха через верхнее и нижнее сопла.

Пятимембранный элемент (Рис.3) сравнения осуществляет алгебраическое суммирование трёх входных пневматических сигналов, которые поступают в камеры Д, Г и В элемента. Через верхнее сопло подводится воздух питания, а нижнее – соединено с атмосферой. Давление в камерах А и Е равно выходному сигналу, который подводится в камеру Б в качестве отрицательной обратной связи.

Интегрирующее звено (Рис.4) образуется при совместном включении элемента сравнения I и инерционного звена II. При этом выходной сигнал звена заводится в камеру Д элемента сравнения. Выходной сигнал этого элемента равен алгебраической сумме его входных сигналов.

Инерционное звено образуется при совместном включении переменного дросселя и пневмоёмкости.

Реле переключения применяют для коммутации пневматических каналов автоматических регуляторов при переключении с автоматического регулирования на ручное.

На базе элементов и узлов системы УСЭППА построены регулирующие устройства системы «Старт». В качестве источника энергии и носителя сигналов в пневматических регуляторах используют сжатый воздух. Наибольшее распространение получили:

- пропорциональное регулирующее устройство ПР2.8, которое состоит из пятимембранного элемента сравнения, задатчика, усилителя мощности и реле переключения;
- пропорционально – интегральное регулирующее устройство ПР3.31, состоящее из пятимембранного и трёхмембранного элементов сравнения, сумматоров, усилителя мощности, повторителя и двух реле переключения.

Вопросы для самоконтроля.

1. Что представляет собой система УСЭППА?
2. Устройство и принцип действия усилителя мощности.
3. Устройство и принцип действия пятимембранного элемента сравнения.
4. Устройство и принцип действия интегрирующего звена.
5. Устройство и принцип действия регулирующего устройства ПР2.8
6. Устройство и принцип действия регулирующего устройства ПР3.31.

Исполнительные устройства автоматизированных систем.

Студент должен:

иметь представление:

- о видах исполнительных устройств;

знать:

- назначение и устройство пневматических исполнительных механизмов;
- назначение и виды электрического привода;
- устройство и принцип действия клапанов;

уметь:

- производить расчёт и выбор клапана.

Пневматические исполнительные механизмы. Назначение, применение приводов пневматического действия, их характеристики. Сервопривод, поршневой привод. Позиционер.

Электрический привод. Назначение и виды регулирующих органов. Устройство и принцип действия одно- и двухседельных, трёхходовых, диафрагмовых клапанов, их применение и материал изготовления. Клапаны отсечные. Заслоночные регулирующие органы, их устройство и принцип работы. Кавитация в регулирующих органах исполнительных устройств. Расчёт и выбор клапана.

Методические указания.

Исполнительное устройство предназначено для реализации сигнала управления, вырабатываемого регулирующим устройством автоматического регулятора. Воздействие на процесс осуществляется изменением расхода проходящей через исполнительное устройство среды таким образом, чтобы это воздействие вызвало изменение регулируемого параметра в нужном направлении.

Исполнительные устройства принято классифицировать по различным признакам.

В зависимости от *вида используемой энергии* исполнительные устройства подразделяются на *пневматические, электрические и гидравлические*.

По *условному давлению* исполнительные устройства делятся на группы: *низких* давлений (до 1,6 МПа); *средних* давлений (до 16 МПа); *высоких* давлений (до 150 МПа).

В зависимости от *конструкции регулирующего органа* различают исполнительные устройства: *односедельные, двухседельные, трёхходовые, шланговые, диафрагмовые, шаровые, заслоночные и клеточные*.

В зависимости от *материала* основных деталей регулирующего органа выпускают исполнительные устройства: *чугунные, стальные, нержавеющей и специальные*.

В зависимости от **расположения входного и выходного патрубков** исполнительные устройства могут быть **проходными и угловыми**.

По **виду действия** исполнительные механизмы подразделяются на **нормально открытые (НО)**, в которых при прекращении подвода энергии, создающей перестановочное усилие, проходное сечение полностью открывается, и **нормально закрытые (НЗ)**, в которых при прекращении подвода энергии, создающей перестановочное усилие, проходное сечение полностью закрывается.

По **защищённости от воздействия окружающей среды** исполнительные устройства изготавливают в **обыкновенном и взрывозащищённом исполнении**.

Регулирующие органы.

Регулирующим органом называется звено исполнительного устройства, представляющее собой переменное гидравлическое сопротивление, которое воздействует на расход среды, изменяя своё проходное сечение.

В **двухседельных регулирующих органах** корпус имеет два седла, а затвор, проходящий через эти сёдла, имеет два утолщения с дросселирующими и запирающими поверхностями. Перемещение затвора относительно сёдел изменяет площадь прохода среды. Основным преимуществом двухседельного регулирующего органа является возможность разгрузки затвора от одностороннего действия силы, создаваемой статическим давлением среды. В большинстве случаев на затворах двухседельных регулирующих органов кроме дросселирующих имеются и запирающие поверхности, и поэтому с целью обеспечения возможности сборки и разборки регулирующего органа диаметр прохода верхнего седла делают большим, чем диаметр прохода нижнего седла, для того чтобы через него прошло нижнее утолщение затвора.

Двухседельные регулирующие органы всегда проектируются таким образом, чтобы изменение их исполнения с НО на НЗ осуществлялось лишь перемонтированием относительного расположения затвора и сёдел при сохранении всех деталей.

Односедельные регулирующие органы могут быть проходными и угловыми. В проходных направление потока среды при входе и выходе не изменяется, а в угловых – при выходе изменяется на 90^0 по отношению к направлению на входе. Односедельные регулирующие органы применяют лишь в случаях, когда невозможно применение разгруженных двухседельных регулирующих органов, а также в случаях, когда необходимо полностью перекрыть поток при закрытии регулирующего органа. Возможность обеспечения герметичности закрытия прохода является важным преимуществом односедельных регулирующих органов.

Трёхходовые регулирующие органы можно применять для непрерывного или двухпозиционного регулирования. Для непрерывного регулирования применяют два вида конструкции: разделительные и смесительные. Первые предназначены для деления потока в изменяющихся соотношениях между двумя линиями, вторые – когда необходимо смешение двух потоков с переменным соотношением в один. Для двухпозиционного регулирования их используют в том случае, когда поток попеременно направляется то в одном, то в другом направлении или когда два потока поочерёдно двигаются в одном направлении.

Регулирующие заслонки изменяют пропускную способность при повороте диска под действием исполнительного механизма. Они имеют ряд преимуществ по сравнению с выше рассмотренными регулирующими органами. В регулирующих заслонках нет зон, в которых могут скапливаться механические частицы и грязь. Поток регулируемой среды значительно меняет своё направление при проходе через заслонку, поэтому сопряжённые дросселирующие поверхности изнашиваются меньше, чем в регулирующих клапанах. Кроме того, заслонки имеют несложную конструкцию, небольшие габариты, массу и стоимость. Основные недостатки регулирующих заслонок – трудность обеспечения плотного перекрытия регулирующего потока, наличие значительных неразгруженных усилий, действующих на диск заслонки.

Диафрагмовые регулирующие органы применяют для регулирования потоков агрессивных сред. В них затвор делают в виде упругого элемента – мембраны, которая, перемещаясь под действием исполнительного механизма относительного седла, изменяет площадь прохода среды. Одновременно диафрагма является разделительной перегородкой, отделяющей подвижные металлические детали от соприкосновения со средой.

Исполнительные механизмы.

В зависимости от вида энергии, используемой для создания перестановочного усилия, исполнительные механизмы подразделяются на пневматические, электрические и гидравлические.

Основные преимущества электрических исполнительных механизмов – большие перестановочные усилия, значительная длина хода штока. Недостатки – относительно большая масса, сложность наладки, обслуживания и ремонта; высокая стоимость.

Преимущества пневматических исполнительных механизмов – простота конструкции, низкая стоимость, пожаро- и взрывобезопасность. Недостатки – ограниченность расстояния между исполнительным механизмом и регулирующим устройством, а также необходимость создания системы снабжения сжатым воздухом.

Относительное преимущество гидравлических исполнительных механизмов – большие перестановочные усилия. Недостатки – необходимость создания специальной гидравлической системы питания и сложность обслуживания.

Лабораторная работа № 4. Изучение конструкции исполнительного устройства и снятие ходовой характеристики клапана.

Запорная арматура предусматривается:

- на всех подающих и обратных трубопроводах тепловых сетей на вводе и выводе их из тепловых пунктов;
- на всасывающем и нагнетательном патрубках каждого насоса;
- на подводящих и отводящих трубопроводах водоподогревателя.

В остальных случаях необходимость установки запорной арматуры определяется проектом. При этом количество запорной арматуры на трубопроводах предусматривается минимально необходимым, обеспечивающим надежную и безаварийную работу. Установка дублирующей запорной арматуры допускается при обосновании.

В качестве отключающей арматуры на вводе тепловых сетей в тепловой пункт применяется стальная запорная арматура. На спускных, продувочных и дренажных устройствах применять

предусматривается защита ее от напряжений изгиба. В тепловых пунктах допускается также применение арматуры из латуни и бронзы.

Обратные клапаны предусматриваются:

- на циркуляционном трубопроводе системы горячего водоснабжения перед присоединением его к обратному трубопроводу тепловых сетей в открытых системах теплоснабжения или к водоподогревателям в закрытых системах теплоснабжения;
- на трубопроводе холодной воды перед водоподогревателями системы горячего водоснабжения за водомерами по ходу воды;
- на ответвлении от обратного трубопровода тепловой сети перед регулятором смешения в открытой системе теплоснабжения;
- на трубопроводе перемычки между подающим и обратным трубопроводами систем отопления или вентиляции при установке смесительных или корректирующих насосов на подающем или обратном трубопроводе этих систем;
- на нагнетательном патрубке каждого насоса до задвижки при установке более одного насоса;
- на обводном трубопроводе у подкачивающих насосов;
- на подпиточном трубопроводе системы отопления при отсутствии на нем насоса;
- при статическом давлении в тепловой сети, превышающем допустимое давление для систем потребления теплоты;
- отсекающий клапан на подающем трубопроводе после входа в тепловой пункт, а на обратном трубопроводе перед выходом из теплового пункта — предохранительный и обратный клапаны.

Не следует предусматривать дублирующие обратные клапаны, устанавливаемые за насосами.

□ Метки водоподогреватели, запорная арматура, клапан обратный, насос, отсекающий клапан, предохранительный клапан, требования к установке, трубопровод

□ Дисковый поворотный затвор: все, что надо знать для выбора и эксплуатации

В зависимости от конструкции и материалов, дисковые поворотные затворы применяются для пресной и морской воды, природного газа, масел, нефтепродуктов, пищевых продуктов, агрессивных и абразивных сред с температурами до 400 °C и давлениями до 25 бар. Наиболее распространены межфланцевые затворы с мягким седловым уплотнением с гладкими проушинами. Эти затворы в зависимости от материала седлового уплотнения применяются на неагрессивные среды с параметрами Р_ы 10/Р_ы 16 и температурой до 120 °C. Основное применение данных затворов — в системах отопления, водоснабжения, вентиляции и кондиционирования.

Пока самым распространенным типом арматуры в тепловодоснабжении является клиновая задвижка.

Недостатки задвижек:

- большие габариты и масса;
- низкая герметичность в затворе задвижки и относительно внешней среды;
- большое время открывания и закрывания;
- корродирующая и прикипающая ходовая резьбовая пара «шпиндель втулка»;
- малый ресурс, требующий ежегодных дорогостоящих ремонтов;
- высокое гидравлическое сопротивление.

Дисковые поворотные затворы являются реальной альтернативой задвижкам, клапанам, шаровым кранам, так как обладают следующими достоинствами:

- низкая цена;
- малые габариты и масса;
- высокая ремонтпригодность;
- удобство при управлении и монтаже;
- не подвержены коррозии;
- низкое сопротивление в открытом положении;

- не требуются прокладки для установки между фланцами. Управление затворами может производиться как вручную, так и при помощи пневмо- или электропривода. для обеспечения безотказной работы в течение всего срока эксплуатации необходимо помнить несколько основных правил:
 - дисковые поворотные затворы устанавливаются в открытом положении;
 - желательно устанавливать дисковые поворотные затворы осью горизонтально;
 - внутренний диаметр фланца должен соответствовать внутреннему диаметру затвора;
 - для установки поворотных затворов применяются только воротниковые фланцы.
- Правила установки дисковых затворов:
- для установки поворотных затворов используются воротниковые фланцы (ГОСТ 12821—80), диаметр которых соответствует номинальному диаметру дискового поворотного затвора;
 - при установке дисковых поворотных затворов прокладки не используются;
 - монтаж дискового поворотного затвора производится в открытом положении во избежание зажатия диска седловым уплотнением с последующим повреждением уплотнения;
 - поворотные затворы устанавливаются в горизонтальном положении штока, так как при вертикальной установке происходит заклинивание, связанное с попаданием твердых частиц в область штока.
- Более 90 % всех неисправностей поворотных затворов связаны с неправильной установкой.