

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное
бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«КАЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА АВТОМАТИЗАЦИИ

Методические указания по выполнению
лабораторных работ

Казань 2013

УДК 681.12
ББК 32.965
Т38

Т38 Технические средства автоматизации: Метод. указания по выполнению лабораторных работ / Сост.: К.Х. Гильфанов, А.Н. Богданов, В.И. Валиева, Т.Н. Шипкова. – Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2013. – 91 с.

Приведены описание установки и порядок выполнения лабораторных работ: «Изучение систем измерения давления и уровня жидкости на основе интеллектуального датчика давления КЭР-АИП-НР-01», «Изучение систем измерения расхода жидкости на основе электромагнитного расходомера-счетчика «ВЗЛЕТ ЭР».

Общая продолжительность аудиторных занятий по лабораторным работам – 8 часов.

Предназначены для студентов, обучающихся по направлениям подготовки 220700 «Автоматизация технологических процессов и производств (энергетика)» и 220400 «Управление в технических системах».

УДК 681.12
ББК 32.965

1. Лабораторная работа № 1

ИЗУЧЕНИЕ СИСТЕМ ИЗМЕРЕНИЯ ДАВЛЕНИЯ И УРОВНЯ ЖИДКОСТИ НА ОСНОВЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО ДАТЧИКА ДАВЛЕНИЯ «КЭР-АИП-НР-01»

Цель работы:

- ознакомиться с системами измерения давления и уровня жидкости на основе измерения гидростатического давления;
- изучить интеллектуальные датчики перепада давления «КЭР-АИП-НР-01» и «КЭР-АИ-СД-01»;
- провести поверку системы измерения уровня по уровнемерному стеклу.

1.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ ОБ ИЗМЕРЕНИИ УРОВНЯ ГИДРОСТАТИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

Измерение уровня жидкостей играет важную роль при автоматизации технологических процессов, особенно если поддержание уровня связано с условиями безопасной работы оборудования. Уровнемеры могут использоваться либо для контроля за отклонением уровня от номинального и в этом случае они имеют двустороннюю шкалу, либо для определения количества жидкости (в сочетании с известными размерами емкости) и в этом случае они имеют одностороннюю шкалу. В зависимости от условий измерения, характера контролируемой среды используются различные методы измерения уровня.

Уровнемеры с визуальным отсчетом. Такие уровнемеры основаны на визуальном измерении высоты уровня жидкости. При невысоких давлениях среды высота уровня измеряется в стеклянной трубке (указательном стекле), сообщающейся с жидкостным и газовым пространствами контролируемого резервуара (рис. 1.1). При повышенных давлениях применяются плоские стекла, на поверхности которых со стороны жидкости нанесены вертикальные граненые канавки. Из условий прочности не рекомендуется применять указательные стекла длиной более 0,5 м, поэтому при большом диапазоне изменения уровня устанавливается несколько стекол в шахматном порядке таким образом, чтобы их диапазоны измерения перекрывались.

Основным источником дополнительной погрешности таких уровнемеров является разница плотностей жидкости в контролируемом резервуаре и в стекле, вызываемая различием температур (особенно если жидкость в резервуаре находится при высокой температуре, а указательное

стекло находится на значительном удалении). Различие плотностей приводит к различию уровней в резервуаре и указательном стекле (уровень в стекле иногда называют «весовым» уровнем); при этом абсолютная погрешность измерения может быть вычислена по формуле

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

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

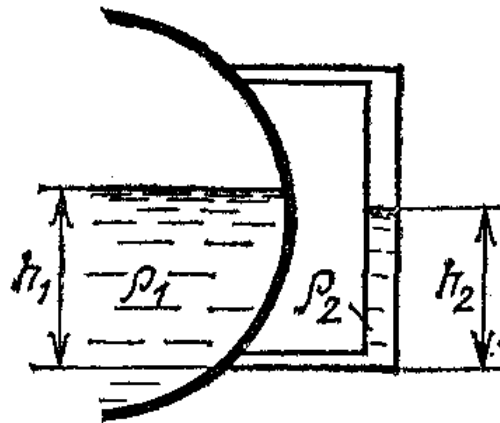


Рис. 1.1. Схема уровнемера с визуальным отсчетом

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

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

$$p = H\rho g. \quad (1)$$

Гидростатический уровнемер, в котором гидростатическое давление жидкости измеряется дифманометром (датчик перепада давления), называется *дифманометрическим*.

Гидростатический уровнемер, в котором гидростатическое давление жидкости преобразуется в давление воздуха, называется *пневмоуровнемером*. Разновидностью пневмоуровнемера является барботажный уровнемер, в котором воздух, подаваемый от постороннего источника, барботирует через слой жидкости.

Дифманометрические уровнемеры. Схема подключения дифманометра к открытому резервуару, находящемуся под атмосферным давлением, изображена на рис. 1.2. Обе импульсные трубки дифманометра заполняются контролируемой жидкостью (если она не агрессивна). Дифманометр измеряет разность давлений p_1 и p_2 , действующих на его

чувствительный элемент. В соответствии с (1) можно записать выражения для этих давлений: $p_1 = (H + h_1) \rho_1 g$; $p_2 = h_2 \rho_2 g$. Таким образом, дифманометр будет измерять перепад давлений, выражающийся через контролируемый уровень H :

$$\Delta p = p_1 - p_2 = (H + h_1) \rho_1 g - h_2 \rho_2 g. \quad (2)$$

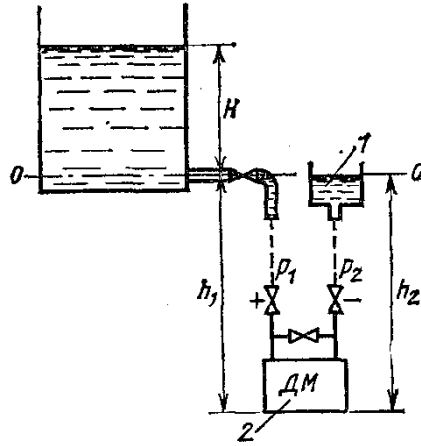


Рис. 1.2. Схема подключения дифманометра при измерении уровня в открытом резервуаре

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

$$\Delta p = H \rho g, \quad (3)$$

где $\rho = \rho_1 = \rho_2$.

Из (2) и (3) видно, что дифманометрический уровнемер измеряет «весовой» уровень, т.е. его показания будут изменяться при изменении плотности контролируемой среды. Погрешность в показаниях появится также, если имеется разность плотностей ρ_1 и ρ_2 в импульсных трубках (для исключения этой погрешности импульсные трубки прокладываются рядом). Наконец, формула (3) справедлива только в том случае, если уровень жидкости в «минусовой» импульсной трубке (обозначенной знаком «-») будет неизменным при изменении контролируемого уровня H .

Для обеспечения этого на этой импульсной трубке устанавливается уравнительный сосуд. Сосуд и импульсная трубка заливаются жидкостью до уровня 00, принятого за начальную отметку шкалы уровнемера. Необходимость установки уравнительного сосуда легко пояснить по рис. 1.3, на котором изображена схема уровнемера без уравнительного сосуда. Предположим, что при нулевом значении измеряемого уровня H уровень жидкости в минусовой импульсной трубке соответствует линии 0-0

(очевидно, что убрать минусовую импульсную трубку и просто соединить минусовую камеру дифманометра с атмосферой нецелесообразно, так как в этом случае при $H = 0$ на дифманометр будет действовать перепад $\Delta p = h_1 \rho g$, т.е. диапазон измерения дифманометра будет использован неполностью).

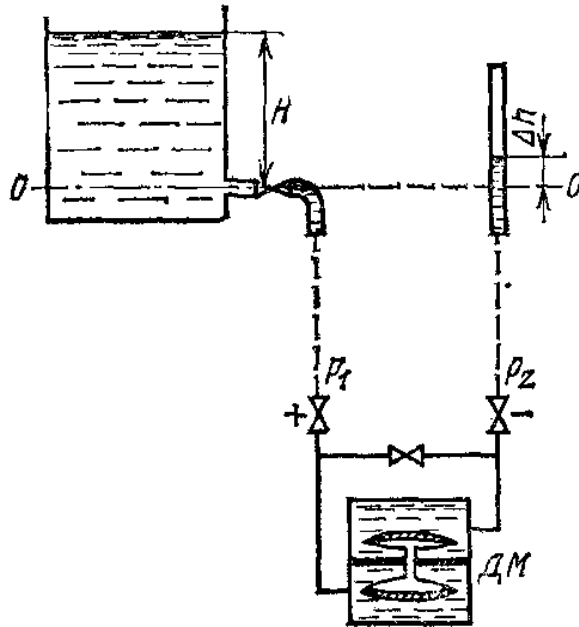


Рис. 1.3. Схема образования погрешности при отсутствии уравнительного сосуда

При увеличении H будет увеличиваться давление p_1 в плюсовой (нижней) камере дифманометра, что вызовет сжатие плюсовой (нижней на рис. 1.3) мембранной коробки. В соответствии с принципом действия дифманометра это приведет к расширению и увеличению объема мембранной коробки в минусовой (верхней на рис. 1.3) камере (изменение объема коробок на рис. 1.3 заштриховано). Очевидно, что такой же объем жидкости будет вытолкнут из верхней камеры в импульсную линию, что приведет к увеличению уровня в ней на Δh .

При этом перепад, действующий на дифманометр, $\Delta p' = H - \Delta h \rho g$. Поскольку $\Delta p' < \Delta p$ (3), показания уровнемера будут заниженными, причем абсолютная погрешность измерения увеличивается с увеличением контролируемого уровня H .

Установкой уравнительного сосуда большого диаметра можно уменьшить Δh , так как один и тот же объем жидкости, вытолкнутой из минусовой камеры дифманометра, в широком сосуде вызовет меньшее изменение уровня, чем в тонкой импульсной трубке.

В случае измерения уровня агрессивной жидкости на импульсных линиях устанавливаются разделительные устройства. При этом дифманометр и импульсные трубки ниже разделительных устройств заполняются неагрессивной жидкостью.

Простейшей схемой измерения уровня жидкости в резервуаре под давлением является представленная на рис. 1.4 схема измерения уровня в барабане котла с использованием однокамерного уравнительного сосуда.

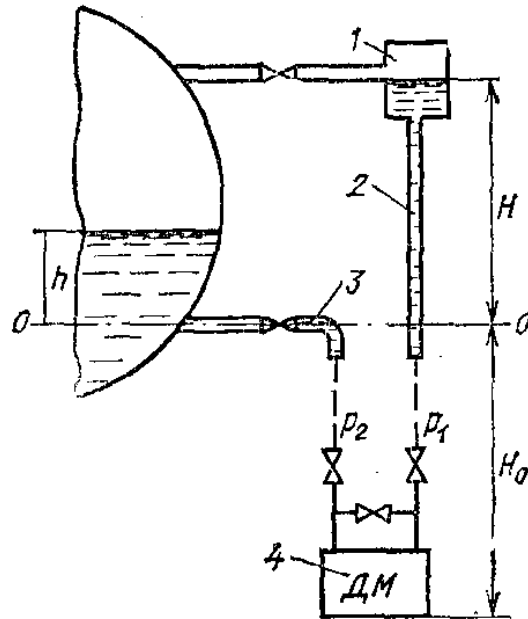


Рис. 1.4. Схема уровнемера барабана котла с однокамерным уравнительным сосудом

Уравнительный сосуд 1 подсоединяется к паровому пространству, причем и сосуд и труба 2 тепловой изоляцией не покрываются. Трубка 3 непосредственно подключается к водяному пространству барабана. Выражение для разности давлений Δp , измеряемой дифманометром 4, может быть легко получено через давления, создаваемые в плюсовой p_1 и минусовой p_2 камерах дифманометра:

$$p_1 = (H + H_0)\rho_B g,$$

где ρ_B – плотность воды в уравнительном сосуде и импульсной трубке 2.

Давление p_2 представляет собой сумму гидростатических давлений столба жидкости h в барабане, имеющего плотность ρ' , столба жидкости H_0 в импульсной трубке 3 плотностью ρ_B и столба пара в барабане высотой $H-h$ и плотностью ρ'' :

$$p_2 = H_0\rho_B g + h\rho' g + (H - h)\rho'' g.$$

Таким образом, перепад Δp , действующий на дифманометр, будет определяться выражением

$$\Delta p = p_1 - p_2 = [H\rho_B - h\rho' - (H-h)\rho'']g = [H(\rho_B - \rho'')]g. \quad (4)$$

Из (4) легко заметить, что показания уровнемера зависят не только от текущего значения H , но и от плотностей воды ρ' и пара ρ'' , которые в свою очередь зависят от температуры и давления среды в барабане. Поэтому расчет шкалы дифманометров-уровнемеров производят на рабочее (номинальное) давление в барабане. Кроме того, на результат измерения будет оказывать влияние изменение плотности воды ρ_B в импульсной трубке, так как при этом изменяется гидростатическое давление столба высотой H в импульсной трубке 2, в то время как давление p_1 должно оставаться постоянным. Это может происходить при изменении температуры окружающей среды или температуры среды в барабане.

На рис. 1.5 представлены графики, иллюстрирующие изменение показаний уровнемера при отклонении давления пара в барабане от расчетного значения 16 МПа при температуре воды в трубке 2 (рис. 1.4), равной 20 °С.

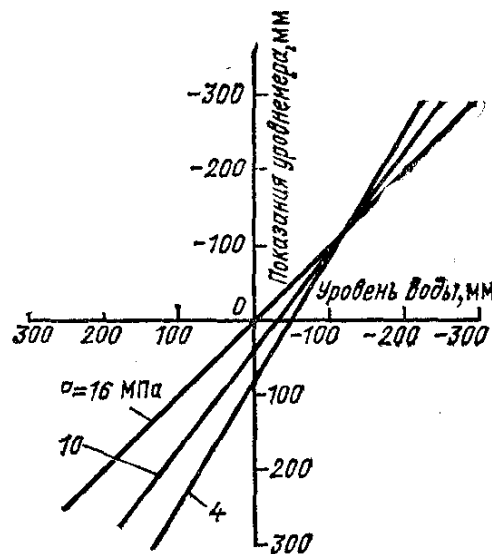


Рис. 1.5. Изменение показаний уровнемера с однокамерным уравнительным сосудом при изменении давления в барабане

Уровнемер измеряет отклонение уровня в барабане от номинального в интервале ± 315 мм, следовательно, номинальный уровень на рис. 1.5 соответствует отметке 0. Из графика видно, что изменение параметров среды в барабане существенно искажает показания уровнемера, причем эта погрешность зависит от текущего значения уровня. Минимальное влияние отклонения параметров уровнемер будет испытывать при уровне,

соответствующем точке пересечения линий, но этот уровень ниже номинального.

Очевидно, что отклонение температуры окружающей среды от расчетной (20 °С) вызывает изменение ρ_B и показаний уровнемера. Уменьшение влияния изменения ρ_B на показания уровнемера может быть достигнуто использованием двухкамерного уравнительного сосуда (рис. 1.6). Внешняя поверхность уравнительного сосуда 1 покрыта тепловой изоляцией, для того чтобы плотность воды в нем и во внутренней трубке 2, соединенной с водяным пространством барабана, была равна плотности воды в барабане, что обусловит равенство уровня воды h в трубке 2 и действительного уровня воды в барабане h_D . Для такой схемы выражение для перепада давления, действующего на дифманометр 3, имеет вид

$$\Delta p = H\rho'g - h\rho'g + (H-h)\rho''g = (H-h)(\rho' - \rho'')g, \quad (5)$$

где ρ' и ρ'' – плотности воды и пара в барабане.

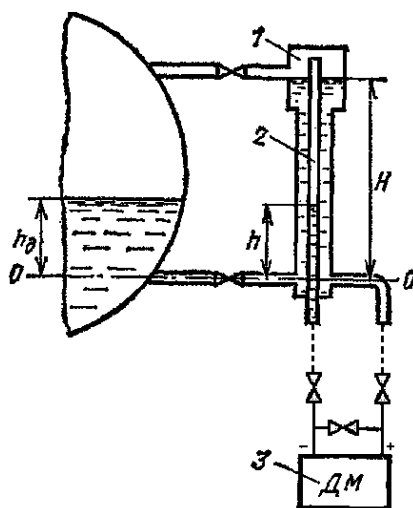


Рис. 1.6. Схема уровнемера с двухкамерным уравнительным сосудом

Таким образом, и при использовании такой схемы показания уровнемера зависят от разности плотностей воды и пара $\rho' - \rho''$, которая определяется режимом работы установки.

На рис. 1.7 представлены графики, характеризующие изменение показаний такого уровнемера при отклонении давления в барабане от расчетного давления 10 МПа. Погрешность уровнемера с двухкамерным уравнительным сосудом, как и с однокамерным, зависит от текущего значения уровня. При определенном его значении, соответствующем точке пересечения линий на рис. 1.7, изменения давления не сказываются на показаниях уровнемера. Это – значение уровня выше номинального

(для схемы рис. 1.4 оно было ниже номинального). В эксплуатации удобно использовать уровнемер, имеющий минимальную погрешность от изменения давления при номинальном уровне в барабане (т.е. уровне, соответствующем точке 0 на рис. 1.5, 1.7). Для такого уровнемера линии, характеризующие зависимость показаний от уровня при различных давлениях (линии на рис. 1.5; 1.7), должны пересекаться в начале координат.

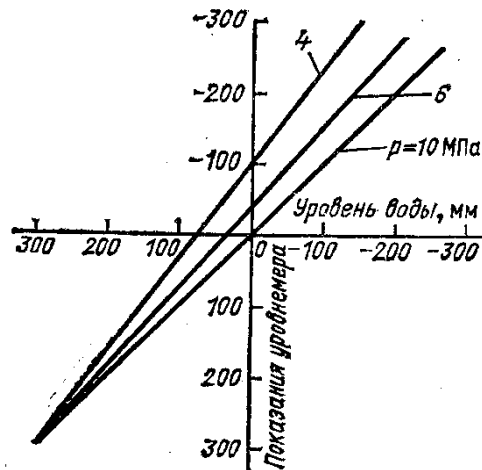


Рис. 1.7. Изменение показаний уровнемера с двухкамерным уравнительным сосудом при изменении давления в барабане

Такие характеристики имеют уровнемеры с комбинированными уравнительными сосудами (рис. 1.8).

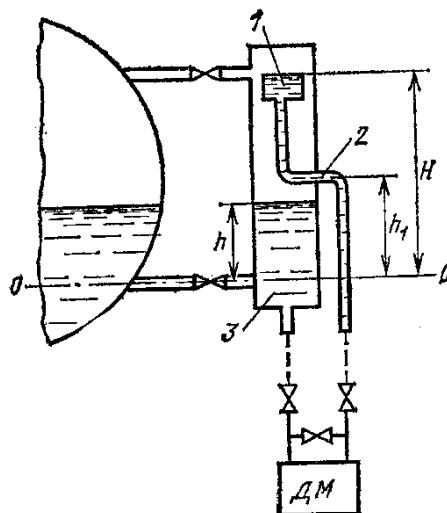


Рис. 1.8. Схема уровнемера с комбинированным уравнительным сосудом

Этот сосуд отличается от двухкамерного сосуда тем, что импульсная трубка 2 от уравнильного сосуда 1 проходит не через весь сосуд 3, а выведена сбоку; таким образом, столб воды высотой h_1 находится в холодном состоянии, так как трубка 2 не изолируется. Внешняя поверхность самого сосуда покрыта тепловой изоляцией. В этом случае перепад давления Δp , действующий на дифманометр, определяется выражением:

$$\Delta p = \rho' (H - h_1) + h_1 \rho_B - \rho'' (H - h_1) - h_1 \rho_B - \rho' h_1, \quad (6)$$

где ρ_B – плотность воды в трубке 2 на участке h_1 .

Из (6) видно, что на зависимость $\Delta p = f(H)$ влияет значение h_1 .

Рекомендуется значение h_1 выбирать из соотношения

$$h_1 = 1,222 (H - h_{cp}),$$

где h_{cp} – номинальный уровень в барабане относительно нулевой линии 0-0 (рис. 1.8).

На рис. 1.9 h_{cp} соответствует отметке шкалы 0.

На рис. 1.9 приведены графики зависимости показаний уровнемера с комбинированным уравнильным сосудом от значений уровня при расчетном давлении в барабане 16 МПа и при давлении 10 и 4 МПа. Как следует из графиков, минимальное влияние изменение давления оказывает практически при номинальном уровне.

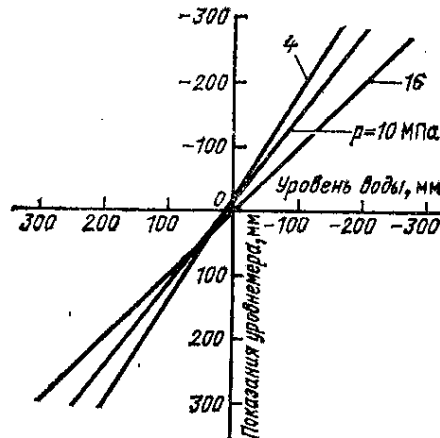


Рис. 1.9. Изменение показаний уровнемера с комбинированным уравнильным сосудом при изменении давления в барабане

Следует отметить, что в схемах с двухкамерными уравнильными сосудами важное значение имеет обеспечение равенства температур в барабане и сосуде. При любом изменении температуры в сосуде относительно барабана появится дополнительная погрешность, так как будет

нарушено основное требование к уравнильным сосудам – стабилизация гидростатического давления в одной из камер дифманометра.

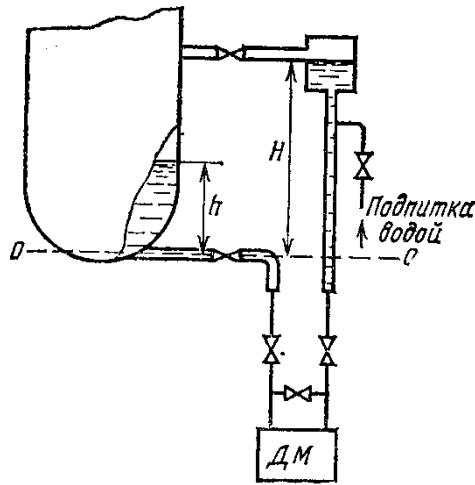


Рис. 1.10. Схема измерения уровня конденсата греющего пара в подогревателях

Все три рассмотренные схемы уровнемеров не обеспечивают независимости показаний от изменения давления при любом текущем значении контролируемого уровня.

Все рассмотренные схемы подключения дифманометров-уровнемеров могут использоваться для измерения уровня жидкостей в объектах электростанций или промышленных предприятий. Конкретная схема измерения определяется условиями работы объекта и необходимой точностью измерения уровня. Так, при измерении уровня в подогревателях питательной или сетевой воды электростанций обычно используются однокамерные уравнильные сосуды (рис. 1.10). Перепад давления, действующий на дифманометр, определяется выражением

$$\Delta p = [H\rho_B - h\rho' - (H - h)\rho'']g$$

$$\text{или } \Delta p = [H(\rho_B - \rho'') - h(\rho' - \rho'')]g,$$

где ρ_B , ρ' и ρ'' – плотности воды в плюсовой импульсной трубке, конденсата и пара.

Схема измерения уровня в конденсаторе турбины представлена на рис. 1.11. В схеме показан однокамерный уравнильный сосуд 1, посредством трубки 2 соединенный с паровым пространством конденсатора 3. Для того чтобы испарение воды в сосуде 1 не приводило к уменьшению уровня, а также для стабилизации температуры воды в плюсовой импульсной трубке в нее непрерывно по трубе 4 через ограничительную диафрагму 5 подается конденсат из напорной линии конденсатного насоса. Избыток

конденсата стекает по напорной линии 2 в конденсатор. Трубка 6
присоединена к всасывающей трубе конденсатного насоса, уровень h_1 в этой
трубке соответствует измеряемому уровню. Перепад Δp , действующий на
дифманометр, определяется выражением

$$\rho' - h\rho' - (H - h)g = (H - h)(\rho' - \rho'')g.$$

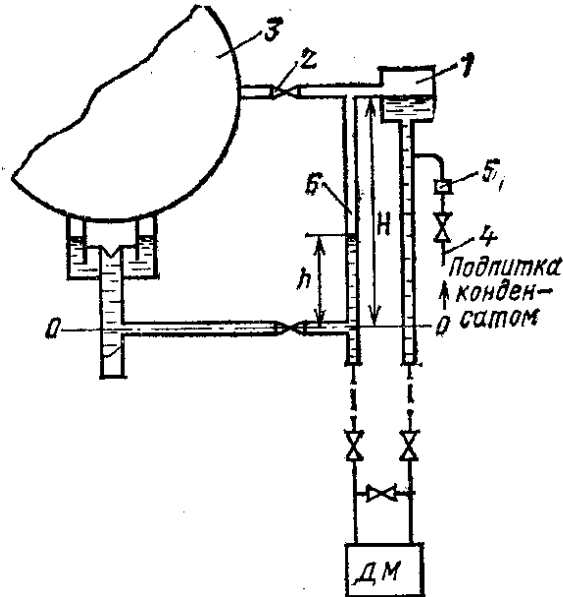


Рис. 1.11. Схема измерения уровня воды в конденсаторе турбины

При давлении в конденсаторе $p' \geq p''$ выражение для перепада давления упрощается: $\Delta p = (H - h)\rho'g$. Дифманометры в качестве измерителей уровня нашли применение также и в криогенной технике для измерения уровня низкокипящих сред. Особенностью подключения дифманометров-уровнемеров к емкостям является отсутствие уравнивательных сосудов (рис. 1.12). Импульсные трубки выводятся из газовой полости и части, заполненной жидкостью, причем последняя выводится горизонтально для исключения возможного влияния столба жидкости в трубке. Если нижняя импульсная трубка будет заполнена жидкостью, то при ее испарении порциями возможно колебание давления в измерительной схеме. Во избежание этого отбор давления осуществляется из специального колпачкового устройства 1. В этом случае жидкость (за счет притока теплоты по импульсной трубке) испаряется в полость под колпачком, что исключает пульсацию давления.

В тех случаях, когда разность температур между контролируемой средой и средой, окружающей резервуар, меньше 50°C , для уменьшения пульсации давления в плюсовой импульсной трубке на ней вблизи резервуара устанавливается тепловая рубашка 2, в которую подается теплая

среда. Этим обеспечивается надежное испарение жидкости в пространство под колпачком.

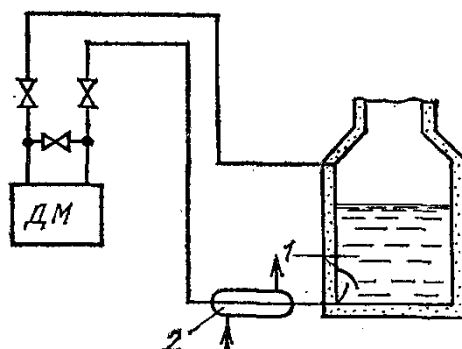


Рис. 1.12. Схема измерения уровня низкокипящих сред дифманометром

Метод измерения уровня дифманометрами обладает рядом достоинств. Такие уровнемеры отличаются механической прочностью, простотой монтажа, надежностью. Но им присущ один существенный недостаток: чувствительный элемент дифманометров находится в непосредственном контакте с контролируемой средой. При измерении уровня агрессивных сред это вызывает необходимость либо использования специальных материалов для дифманометров, либо применения схем подключения дифманометров, не допускающих попадания активных сред в дифманометр, например, включение в импульсные линии разделительных устройств, продувка импульсных линий чистой водой и т.д.

От этого недостатка свободен один из типов гидростатических уровнемеров – барботажный пневмоуровнемер.

1.2. ИЗМЕРЕНИЕ ДАВЛЕНИЯ В АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМАХ

Давление, его виды и единицы измерения. Давление является одним из важнейших физических параметров, и его измерение необходимо как в расчетных целях, например, для определения расхода, количества и тепловой энергии среды, так и в технологических целях, например, для контроля и прогнозирования безопасных и эффективных гидравлических режимов напорных трубопроводов, используемых на предприятии. Рассмотрим основные понятия, связанные с давлением и его измерением.

Давлением P называют отношение $P = F/S$ абсолютной величины нормального, то есть действующего перпендикулярно к поверхности тела, вектора силы F к площади S этой поверхности. Если сила равномерно

распределена по площади, то указанное отношение задает точное значение давления в каждой ее точке, в противном же случае – только его среднее значение (точное значение меняется от точки к точке и определяется пределом отношения силы ΔF , приложенной на бесконечно малом участке поверхности, к его площади ΔS). В отличие от силы, величина которой может зависеть от размеров поверхности ее приложения, давление позволяет при рассмотрении взаимодействия физических тел исключить фактор площади, поскольку оно является удельной, то есть отнесенной к единице площади, силой.

Виды измеряемых давлений. Жидкие и газообразные среды характеризуются свойствами упругости – обратимого изменения объема, то есть уменьшения объема среды при ее сжатии под давлением и восстановления исходного объема при снятии этого давления, и текучести – обратимого изменения формы. В этих средах различают давление внешнее (поверхностное) – на границе (поверхности) сред и внутреннее – внутри, в объеме или массе среды.

Внешнее давление P на поверхность S жидкой или газообразной среды, равно отношению нормальной составляющей суммы сил F , приложенной извне, к площади поверхности S , передается внутрь среды (рис. 1.13) без изменений и равномерно во все стороны. То есть порождаемое внутреннее давление направлено перпендикулярно к любой внутренней площадке среды ΔS , независимо от ее формы и положения в среде, а величина давления в среде пропорциональна величине выделенной площадки (закон Паскаля). Очевидно, что $P = F/S = \Delta F/\Delta S$ для любой точки среды. Внутреннее давление покоящихся жидких и газообразных сред зависит не только от внешнего давления, но и от веса самой среды. Эта зависимость наиболее существенна для жидкостей, обладающих большей плотностью, чем газы. Положение точки измерения относительно горизонтальных плоскостей – поверхностей равного давления – определяет весовую составляющую внутреннего давления – гидростатическое давление. Закон Паскаля справедлив не только для покоящихся, но и для движущихся сред, если их можно считать идеальными (отсутствует трение между слоями среды – вязкость). В вязких же движущихся средах величина внутреннего давления зависит от направления, и поэтому под внутренним давлением среды понимают его усредненное значение по трем взаимно перпендикулярным направлениям в точке измерения. Полное внутреннее давление в движущейся среде, например, горизонтального напорного трубопровода определяется суммой внешнего, гидростатического и гидродинамического давления – скоростного напорного давления, а также потерями давления на трение по всей длине трубы и вихревыми потерями при изменениях величины и направления потока в

гидравлических сопротивлениях – коленах, задвижках, диафрагмах. В напорных трубопроводах с энергоносителями измеряется, как правило, статическое давление, которое является разностью полного и динамического давлений; при этом скоростные характеристики потока учитываются в расходомерах и счетчиках при измерениях расхода и количества среды.

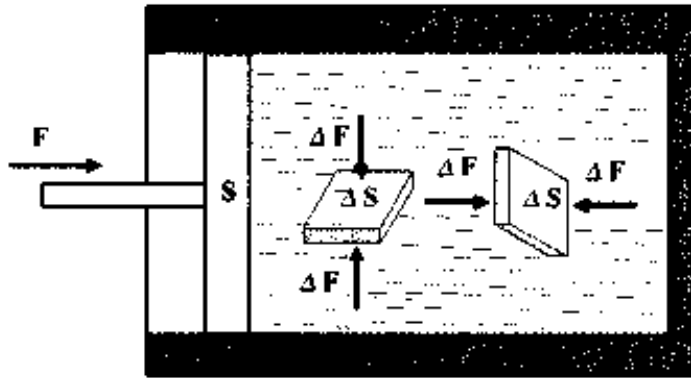


Рис. 1.13. Силы давления в жидкой и газообразной средах:
 F – внешняя сила, S – свободная поверхность (площадь) среды,
 ΔF – сила давления на внутреннюю площадку ΔS

На практике давления газообразных и жидких сред могут измеряться относительно двух различных уровней (рис. 1.14):

- 1) уровня абсолютного вакуума, или абсолютного нуля давления – идеализированного состояния среды в замкнутом пространстве, из которого удалены все молекулы и атомы вещества среды,
- 2) уровня атмосферного, или барометрического, давления (ГОСТ 8.271-77).



Рис. 1.14. Виды измеряемых давлений в точках 1, 2, 3 физического процесса

Давление, измеряемое относительно вакуума, называют *давлением абсолютным (ДА)*. *Барометрическое давление (ДБ)* – это абсолютное давление земной атмосферы. Оно зависит от конкретных условий измерения: температуры воздуха и высоты над уровнем моря. Давление, которое больше или меньше атмосферного, но измеряется относительно атмосферного, называют соответственно *избыточным (ДИ)* или давлением разрежения, *вакуумметрическим (ДВ)*. Очевидно, что $ДА = ДБ + ДИ$ или $ДА = ДБ - ДВ$. При измерении разности давлений сред в двух различных процессах или двух точках одного процесса, причем таких, что ни одно из давлений не является атмосферным, такую разность называют *дифференциальным давлением (ДД)*.

Системные и внесистемные единицы измерения давления. Единицы измерения давления (СТСЭВ 1052-89) определяются одним из двух способов: 1) через высоту столба жидкости, уравнивающей измеряемое давление в конкретном физическом процессе: в единицах водяного столба при 4 °С (мм вод. ст. или м вод. ст.) или ртутного столба при 0 °С (мм рт. ст., или Торр) и нормальном ускорении свободного падения (в англоязычных странах используются соответствующие единицы in H₂O, ft H₂O – дюйм вод. ст., фут вод. ст. и in Hg – дюйм рт. ст.; 1 дюйм = 25,4 мм, 1 фут = 30,48 см); 2) через единицы силы и площади.

В Международной системе единиц (СИ), принятой в 1960 году, единицей силы является Н (ньютон), а единицей площади – м². Отсюда определяются единица давления паскаль Па = 1 Н/м² и ее производные, например, килопаскаль (1 кПа = 10³ Па), мегапаскаль (1 МПа = 10⁶ Па). Наряду с системой СИ в области измерения давления продолжают использоваться единицы и других, более ранних систем, а также внесистемные единицы.

В технической системе единиц МКГСС (метр, килограмм-сила, секунда) сила измеряется в килограммах силы (1 кгс = 9,8 Н). Единицы давления в МКГСС – кгс/м² и кгс/см²; единица кгс/см² получила название технической, или метрической атмосферы (ат). В случае измерения в единицах технической атмосферы избыточного давления используется обозначение «ати».

В физической системе единиц СГС (сантиметр, грамм, секунда) единицей силы является дина (1 дин = 10⁻⁵ Н). В рамках СГС введена единица давления бар (1 бар = 1 дин/см²). Существует одноименная внесистемная, метеорологическая единица бар, или стандартная атмосфера (1 бар = 10⁶ дин/см²; 1 мбар = 10⁻³ бар = 10³ дин/см²), что иногда, вне контекста, вызывает путаницу. Кроме указанных единиц на практике используется такая внесистемная единица, как физическая, или нормальная атмосфера (атм), которая эквивалентна уравнивающему столбу 760 мм рт. ст.

Изредка находит применение единица давления из системы единиц МТС (метр, тонна, секунда) пьеза ($1 \text{ пз} = 1 \text{ сн/м}^2$, где $1 \text{ сн} = 10^8 \text{ дин}$ – сила в 1 стень, сообщающая телу массой в 1 тонну ускорение 1 м/с^2). В англоязычных странах широко распространена единица давления пси ($\text{psi} = \text{lbf/in}^2$) – фунт силы на квадратный дюйм ($1 \text{ фунт} = 0,4536 \text{ кг}$). При измерении абсолютного и избыточного давления используются соответственно обозначения psia (*absolute* – абсолютный) и psig (*gage* – избыточный).

Диапазон давлений, измеряемых в технике, достигает 17 порядков: от 10^{-8} Па в электровакуумном оборудовании до 103 МПа при обработке металлов давлением. Материальным хранителем единиц давления являются первичные (национальные) и вторичные (рабочие) эталоны давления. Для поддиапазона $1 \div 100$ кПа избыточных, абсолютных и разностных давлений в качестве первичного эталона используется, как правило, ртутный двухтрубный (*U*-образный) манометр с лазерным считыванием высоты мениска (погрешность считывания не более 10^{-3} мм, а абсолютная суммарная погрешность прибора, учитывающая в том числе и влияние температуры, не превышает 0,0005 % от верхней границы диапазона). Для поддиапазона $100 \text{ кПа} \div 100 \text{ МПа}$ применяются газовые грузопоршневые манометры (точность 0,0035–0,004 % от показаний). Газовые и жидкостные грузопоршневые манометры используются и как рабочие эталоны для передачи единиц давления промышленным образцовым приборам (их точность 0,01–0,1 %).

Классификация средств измерения давления. Для прямого измерения давления жидкой или газообразной сред с отображением его значения непосредственно на шкале, табло или индикаторе первичного измерительного прибора применяются *манометры* (ГОСТ 8.271-77). Если отображение значения давления на самом первичном приборе не производится, но он позволяет получать и дистанционно передавать соответствующий измеряемому параметру сигнал, то такой прибор называют *измерительным преобразователем давления (ИПД)*, или *датчиком давления*. Возможно объединение этих двух свойств в одном приборе (манометр-датчик).

Манометры классифицируют по принципу действия и конструкции, по виду измеряемого давления, по применению и назначению, по типу отображения данных и другим признакам (рис. 1.15). По принципу действия манометры можно подразделить на жидкостные (измеряемое давление уравнивается гидростатически столбом жидкости – воды, ртути – соответствующей высоты), **деформационные** (давление определяется по величине деформации и перемещения упругого чувствительного элемента (УЧЭ) – мембраны, трубчатой пружины, сильфона), **грузопоршневые** (измеряемое или воспроизводимое

давление гидростатически уравнивается через жидкую или газообразную среду прибора давлением веса поршня с грузоприемным устройством и комплектом образцовых гирь), **электрические** (давление определяется на основании зависимости электрических параметров: сопротивления, емкости, заряда, частоты – чувствительного элемента ЧЭ от измеряемого давления) и другие (тепловые, ионизационные, термопарные и т.п.). В промышленности при локальных измерениях давлений энергоносителей в большинстве случаев используются деформационные манометры на основе одновитковой трубчатой пружины – трубки Бурдона – для показывающих стрелочных приборов или с многовитковыми пружинами для самопишущих манометров), но на смену им приходят электрические манометры с цифровым табло и развитой системой интерфейсов.



Рис. 1.15. Классификация манометров

По виду измеряемого давления манометры подразделяют на приборы измерения избыточного и абсолютного давления – собственно манометры, разрежения – *вакуумметры*, давления и разрежения – *мановакуумметры*,

атмосферного давления – *барометры* и разностного давления – *дифференциальные манометры (дифманометры)*. Манометры, вакуумметры и мановакуумметры для измерения небольших (до 20–40 кПа) давлений газовых сред называют соответственно *напоромерами, тягомерами и тягонапоромерами*, а дифманометры с таким диапазоном измерения – микроманометрами (ГОСТ 8.271-77). Технические характеристики всех этих средств измерения давления определяются соответствующими общими техническими условиями (ГОСТ 2405-88, ГОСТ 18140-81 и другими).

По области применения манометры подразделяют на *общепромышленные*, или *технические*, работающие в промышленных условиях (при перепадах температур и влажности окружающей среды, вибрациях, загрязнении внешней среды и т.п.), *лабораторные* (приборы повышенной точности для использования в комфортных и стабильных условиях лабораторий), *специальные* (применяются в экстремальных условиях: на железнодорожном транспорте, судах, котельных установках, при работе с кислотными и другими агрессивными средами), *образцовые* (для поверки рабочих манометров) и *эталонные* (хранители единиц давления с целью передачи их образцовым приборам).

По типу отображения значений измеряемого давления манометры подразделяют на показывающие – с визуальным считыванием данных непосредственно по аналоговой (стрелочной) или цифровой шкале прибора, на сигнализирующие (электроконтактные) – с выдачей управляющего электрического сигнала путем замыкания или размыкания контактов при достижении измеряемым давлением заранее установленного контрольного значения, на регистрирующие (самопишущие) – с записью в память значений давления как функции времени и их отображением на электронном табло.

Манометры выполняют функцию локального контроля и в большинстве случаев из-за отсутствия возможности дистанционного доступа к их показаниям (за исключением манометров с унифицированным выходным электрическим сигналом) не могут использоваться для целей современной автоматизации. Такую возможность обеспечивают измерительные преобразователи давления (рис. 1.16). По способу обработки и отображения измеряемого давления ИПД подразделяют на первичные (формируют для дистанционной передачи выходной сигнал, соответствующий измеряемому давлению) и вторичные (получают сигнал от первичных преобразователей, обрабатывают его, накапливают, отображают и передают на более высокий уровень системы). Современная тенденция развития ИПД заключается в их «интеллектуализации» на базе микроэлектронной технологии и микропроцессорной техники, предполагающей

передачу части функций системы управления вторичным преобразователям, а некоторых традиционных функций вторичных преобразователей – первичным.



Рис. 1.16. Классификация измерительных преобразователей давления

Известны десятки способов преобразования давления в электрический сигнал, но только некоторые из них получили широкое применение в общепромышленных ИПД. По принципу действия, или способу преобразования измеряемого давления в выходной сигнал, первичные ИПД подразделяют прежде всего на деформационные и электрические. Во-первых, деформационные перемещения УЧЭ (мембраны, сильфона, трубки Бурдона) трансформируются с помощью дополнительных промежуточных механизмов и преобразователей (например, магнитотранзисторного или

оптоэлектронного) в электрический или электромагнитный сигнал, а во-вторых, измеряемое давление, оказывая воздействия на ЧЭ, изменяет его собственные электрические параметры: сопротивление, ёмкость или заряд, которые становятся мерой этого давления. Подавляющее большинство современных общепромышленных ИПД реализованы на основе ёмкостных (используют УЧЭ в виде конденсатора с переменным зазором: смещение или прогиб под действием прилагаемого давления подвижного электрода-мембраны относительно неподвижного изменяет ёмкость УЧЭ), пьезоэлектрических (основаны на зависимости поляризованного заряда или резонансной частоты пьезокристаллов: кварца, турмалина и других – от давления) или тензорезисторных (используют зависимость активного сопротивления проводника или полупроводника от степени его деформации) принципах. В последние годы получили развитие и другие принципы создания ИПД: волоконно-оптические, гальваномагнитные, объёмного сжатия, акустические, диффузионные и т.д.

Самыми популярными в России являются тензорезисторные ИПД. Тензорезисторные чувствительные элементы (ТРЧЭ) (в переводной литературе их иногда называют пьезорезисторными, не надо путать с пьезоэлектрическими) представляют собой металлическую и/или диэлектрическую измерительную мембрану, на которой размещаются тензорезисторы (чаще всего в виде уравновешенного измерительного моста) с контактными площадками для проводного подключения к внутренней или внешней электроизмерительной схеме – электронному блоку обработки. Деформация мембраны под воздействием внешнего давления P приводит к локальным деформациям тензорезисторного моста и его разбалансу – изменению сопротивления, которое измеряется электронным блоком (рис. 1.17). Тензорезисторы (ТР) выполняются как из металла (проволочные, фольговые или плёночные), так и из полупроводника (поликристаллические из порошкообразного полупроводника и монокристаллические из кристалла кремния). Поскольку чувствительность полупроводниковых ТР в десятки раз выше, чем у металлических, и, кроме того, интегральная технология позволяет в одном кристалле кремния формировать одновременно как тензорезисторы, так и микроэлектронный блок обработки, то в последние годы получили преимущественное развитие интегральные полупроводниковые ТРЧЭ. Такие элементы реализуются либо по технологии диффузионных резисторов с изоляцией их от проводящей кремниевой подложки p - n переходами – технология «кремний на кремнии», либо по гетероэпитаксиальной технологии «кремний на диэлектрике» на стеклокерамике, кварце или сапфире. Для ТРЧЭ, особенно полупроводниковых, существенно влияние температуры на упругие и

электрические характеристики ТР, что требует применения специальных схем температурной компенсации погрешностей (в частности, с этой целью в расширенной схеме тензомоста используются компенсационные резисторы и терморезисторы). Особенно широкое применение в изготовлении общепромышленных ИПД в силу своих высоких механических, изолирующих и теплоустойчивых качеств получила технология КНС – «кремний на сапфире».

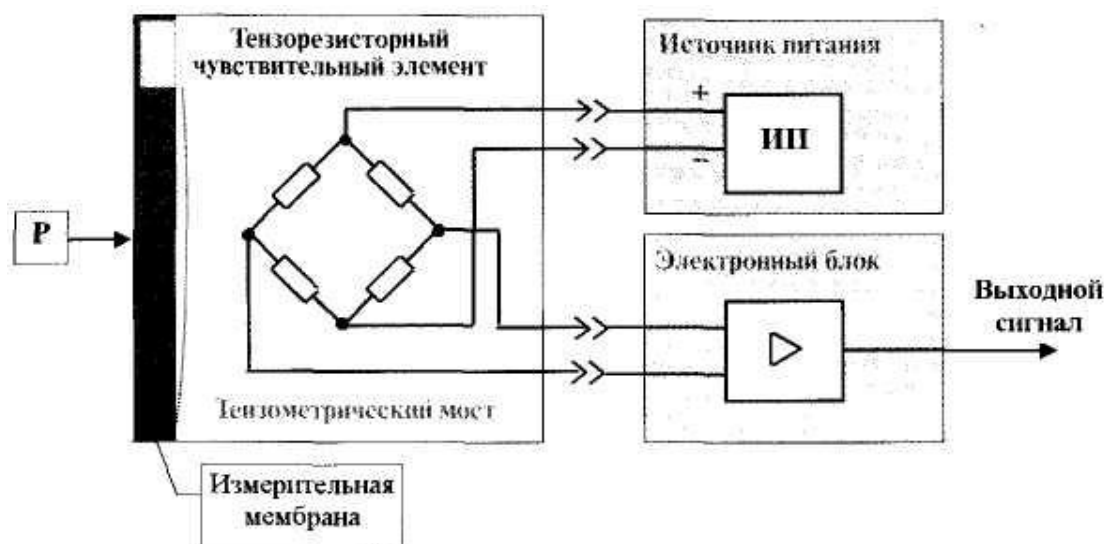


Рис. 1.17. Структурная схема первичного тензорезисторного ИПД

По выходному сигналу ИПД подразделяются на аналоговые и цифровые. Основной парк действующих ИПД относится к аналоговым с унифицированным токовым сигналом 0...5, 0...20 или 4...20 мА. В последнее десятилетие наметился переход к ИПД с цифровым выходом. Широкое распространение получил цифровой протокол HART. Этот открытый стандартный гибридный протокол двунаправленной связи предусматривает передачу цифровой информации поверх стандартного аналогового сигнала 4–20 мА. Бурно развивается системная интеграция первичных преобразователей с использованием различных разновидностей промышленных сетей (*Foundation Fieldbus, ModBus, Profibus* и др.). При этом используется полностью цифровой коммуникационный протокол для передачи информации в обоих направлениях между ИПД и системами управления, существенно облегчая взаимозаменяемость приборов разных мировых производителей. В отечественных цифровых ИПД пока преобладают такие цифровые интерфейсы, как ДДПК (двоично-десятичный параллельный код), ИРПС (интерфейс радиальный последовательный) и RS-232C. ИПД различаются, кроме того, по видам измеряемого давления, используемым единицам измерения и ряду основных технических

параметров (ГОСТ 22520-85): диапазону измеряемого давления (выбирается для каждой модели из стандартного ряда давлений), пределу основной допускаемой погрешности (определяется при нормальной температуре +25 °С от верхнего предела диапазона измерения и включает в себя, как правило, погрешности от гистерезиса ЧЭ, его линейности и воспроизводимости результатов измерения), пределу дополнительной температурной погрешности (этот предел задается от изменения температуры относительно нормальной на каждые 10 или 28 °С или на весь температурный диапазон работы), допустимому рабочему диапазону температур окружающей среды (иногда дополнительно указывают допустимый диапазон температур технологического процесса или измеряемой среды и корпуса прибора), динамическому диапазону измерения давлений (отношению максимального значения измеряемого давления к минимальному), стабильности метрологических характеристик во времени (как процент от верхнего предела диапазона измерения в течение 6 или 12 месяцев), устойчивости к вибрациям, защите от высокочастотных помех, климатическим и взрывозащищенным исполнениям (ГОСТ 15150-69 и ГОСТ 14254-96), требованиям к источнику питания и по другим параметрам.

Общепромышленные измерительные преобразователи давления.

В реальных условиях пользователь вынужден рассматривать различные рабочие характеристики множества ИПД, чтобы выбрать из них оптимальный для конкретных условий применения, причем этот выбор зависит от многих факторов (стоимость, точность, температура, вид среды, информационная, конструктивная и технологическая совместимость со средствами обработки верхнего уровня системы и т.д.). Выбор по единственному критерию «чем дешевле, тем лучше» чаще всего приводит к ложной экономии, если в комплексе не учитываются дополнительные затраты конкретного применения, эксплуатационные издержки и показатели надёжности.

Современные общепромышленные ИПД – это интеллектуальные, со встроенным микропроцессором, интегральные преобразователи с цифровым интерфейсом. Они обладают свойствами диагностики и конфигурирования на расстоянии (установка нуля и диапазона шкалы, выбор технических единиц, ввод данных для идентификации и физического описания датчика и т.п.), обеспечивают более высокое соотношение измеряемых диапазонов, улучшенную температурную компенсацию, повышенную основную точность. Однако это не значит, что другие ИПД уже не нужны: каждый тип ИПД имеет свою эффективную пользовательскую нишу.

Ряд датчиков давления выпускается предприятиями, входящими в объединение «Промприбор». Аналоговый ИПД «ИНСАР» использует

полупроводниковый первичный преобразователь давления на основе кремниевого мембранного ТРЧЭ и позволяет заменить «Сапфир-22» при измерениях давления воздуха или газов (в том числе и агрессивных). Пьезорезонансный датчик избыточного давления «Кварц-ДИ» в качестве ЧЭ использует пьезочувствительный кварцевый резонатор – кристаллический сдвоенный микрокамертон, закрепленный на кварцевой мембране; измеряемое давление через разделительную мембрану и жидкость передается на кварцевую мембрану, вызывая ее деформацию и меняя резонансную частоту тензорезонатора. «Кварц-ДИ» отличается малыми основной (0,1–0,25 %) и дополнительной температурной (0,1 % на каждые 10 °С изменения температуры) погрешностями, имеет как стандартный унифицированный токовый выход, так и частотный выход. Цифровой манометр ДМ 5001 сочетает в себе качества манометра (индикация значения давления на электронном цифровом табло) и датчика (унифицированный токовый выход, а также цифровые выходы в параллельном двоично-десятичном коде уровня TTL и в стандарте последовательного интерфейса ИРПС). Комплекс датчиков «Сигнал» использует в качестве чувствительного элемента КНС-структуру – пластину монокристаллического сапфира с пленкой кремния, в котором реализованы тензорезисторы.

Промышленной группой «Метран» выпускаются датчики «Сапфир-22М», «Метран-22» и «Метран-43, -45». Первые два типа датчиков полностью взаимозаменяемы, но «Метран-22» обеспечивает повышенные точностные и эксплуатационные характеристики (улучшена регулировка и подстройка диапазона измерений, повышена надежность изделия, унифицированы схемотехнические решения). Все датчики используют «сухую» (без разделительной жидкости) конструкцию приемника давления и выпускаются в исполнениях: «общепромышленное», «искробезопасное» или «взрывонепроницаемая оболочка». По-своему интересен датчик «Метран-44» с 3-мембранной конструкцией (измерительная мембрана защищена двумя разделительными мембранами и кремнийорганической жидкостью), обеспечивающей коррозионную стойкость в химически агрессивных средах.

Большинство из уже упомянутых ИПД, при всех своих достоинствах, определяющих их широкое применение в промышленности, обладает двумя существенными недостатками: низкими интеллектуальными и интерфейсными возможностями. В этих условиях экономически оправданным может оказаться приобретение ИПД ведущих мировых производителей или их отечественных аналогов (например, «Метран-1151» является аналогом интеллектуального датчика «*Alphaline 1151*» фирмы *Fisher-Rosemount*).

Кроме массовой модели «*Alphaline 1151*», в продукции *Fisher-Rosemount* выделяются один из самых точных общепромышленных датчиков – модель 3051, а также интеллектуальный датчик с точностью 0,2 % и возможностью перестройки диапазонов измерений 20:1 и 10:1 – модель 2088.

Фирма *Honeywell* предлагает датчики давления SMW3000 линии *Smartline* и ST3000 линии *Fieldbus*. Многопараметровый датчик SMW3000 (модель STM125) одновременно измеряет три параметра процесса: абсолютное давление и перепад давлений с одной трубной вставки (самого устройства, подключаемого к трубе) и температуру с отдельного стандартного датчика температуры – термопреобразователя сопротивления Pt 100 или термопары. Давление в приборе измеряется пьезорезистивным тензодатчиком. Микропроцессорная обработка результатов обеспечивает широкий диапазон измерений давления – 400:1 по давлению дифференциальному (ДД) и 150:1 по давлению избыточному (ДИ), повышенную точность – 0,075 % в цифровом режиме передачи данных и улучшенную компенсацию по температуре – дополнительная температурная погрешность не превышает 0,0875 % на каждые 28 °С. Датчик дифференциального давления STD924 серии ST 3000 обеспечивает соотношение измеряемых диапазонов 16:1 и суммарную дополнительную температурную погрешность в пределах 0,4 % от диапазона на каждые 28 °С изменения температуры относительно номинальной.

Высоконадежные и высокоточные интеллектуальные ИПД SITRANS P (серии МКП, DS, НК) фирмы *Siemens* предназначены для измерения уровня избыточного, дифференциального и абсолютного давления жидкости от 1 мбар до 4000 бар. Для различных задач можно воспользоваться различными преобразователями с разнообразными соединениями и насадками. Возможно использование местных индикаторов. Устройства SITRANS P существуют в стандартном исполнении (выход 4–20 мА), *Smart* (с использованием HART) и с подключением *Profibus-PA*. Обеспечивается возможность бесступенчатой перестройки диапазона измерения по месту.

Датчики серии Z могут быть использованы для решения задач, не требующих высокой точности измерения, а также перестройки диапазона измерения в процессе эксплуатации. Они предназначены для измерения избыточного и абсолютного давления газов, жидкостей и пара в энергетической и машиностроительной индустрии, системах водоснабжения и т.п. и отличаются малым весом и габаритами. Датчик состоит из тонкоплёночной измерительной ячейки с керамической мембраной и электронной схемы, которые встроены в корпус из нержавеющей стали

(IP65). В эксплуатации преобразователи не требуют технического обслуживания, кроме периодической проверки нуля диапазона.

Установка и использование измерительных преобразователей давления. Установка конкретного ИПД для измерения давления в напорном трубопроводе должна производиться таким образом, чтобы исключить или свести к минимуму влияние на процесс измерения и эксплуатации прибора таких дестабилизирующих и опасных факторов, как: а) высокие температуры среды энергоносителя и внешней окружающей среды, б) вибрации трубопровода, в) химическая агрессивность среды энергоносителя, г) взрывоопасность среды энергоносителя и внешней среды, д) электромагнитные помехи и радиация. С учетом предельных характеристик ИПД и конкретных условий окружающей среды преобразователи устанавливаются и закрепляются либо непосредственно на трубе в месте измерения давления, либо дистанционно на настенной панели с подводкой к измеряемой среде посредством соединительных трубок (рукавов) и, если необходимо, разделителей мембранных (РМ) или сосудов уравнивающих и уравнивающих конденсационных. Кроме того, как в первом, так и во втором случаях подключение ИПД осуществляется, как правило, через вентильный (клапанный) блок, позволяющий, во-первых, отключить через запорный вентиль прибор от точки измерения, во-вторых, с целью контроля и поверки прибора в рабочих условиях подключить параллельно прибору через уравнивающий вентиль другой контрольный (образцовый) прибор или другую среду (например, атмосферный воздух), в-третьих, через спусковой (продувочный или дренажный) вентиль удалить скопившийся газ или конденсат из измерительной полости прибора или соединительной трубки.

При измерении давления химически агрессивных сред необходимо либо использовать ИПД с соответствующими защитными характеристиками (например, с защитным фторопластовым слоем наружной стороны измерительной мембраны или со встроенной внутренней защитно-разделительной мембраной из коррозионно-стойкого материала, например, титана или тантала), либо применять внешние выносные РМ, которые могут соединяться с ИПД непосредственно через штуцер прямым монтажом или капиллярным монтажом через соединительную трубку. Использование внешних РМ позволяет применять обычные ИПД в условиях, превышающих их защитные характеристики: в агрессивной среде, при наличии в среде твердых осадков и абразивов, в вязкой среде (например, мазуте), при повышенных санитарно-гигиенических требованиях к процессу измерения (среды медицинских или пищевых продуктов). Внешние разделители содержат, как правило, замкнутую полость между двумя разделительными мембранами, наполненную инертной жидкостью (например, силиконовым маслом). Передача

давления от РМ к измерительной мембране ИПД через соединительные трубки также осуществляется посредством жидкости, заполняющей эти трубки.

На практике часто вместо РМ используются устаревшие безмембранные разделительные сосуды, в которых часть сосуда заполняется измеряемой средой, а другая часть со стороны ИПД и соединительной трубки – передаточной, или разделительной жидкостью. Такое решение при измерении жидких сред может со временем привести к смешиванию в результате диффузии измеряемой и разделительной сред, то есть утрате самой разделительной функции с соответствующими последствиями, а при измерении газовых сред – к диффузии газа в разделительную среду с переводом ее в двухфазное состояние с потерей функции несжимаемости, что ведет к росту погрешности измерения давления.

Соединительные трубки (металлические) используются прежде всего с целью снижения температуры измерительной или передаточной среды до допустимого температурного диапазона работы конкретного ИПД. Для этого трубки выполняются без тепловой изоляции, а их длина выбирается таким образом, чтобы в месте установки прибора температура среды не превышала допустимого значения. При длинной соединительной трубке (обычно ее длина не превышает нескольких десятков метров) у места ее присоединения к трубопроводу устанавливается дополнительный запорный вентиль для отключения трубки в случае аварии. Трубки не должны вносить дополнительные погрешности в измерение давления, и с этой целью их надлежит заполнять однофазной несжимаемой передаточной средой, а также присоединять к трубопроводу и прокладывать так, чтобы исключить образование в них двухфазных сред – газоздушных пузырей («газовых мешков») при измерении давления жидких сред или конденсата при измерении давления газовых сред (рис. 1.18, 1.19). Это достигается подключением трубок к горизонтальному трубопроводу с середины его профиля при измерении давления жидких сред и сверху – при измерении газовых сред, а также прокладкой соединительных трубок с уклоном в сторону, обеспечивающую удаление газов (уклон вниз) или конденсата (уклон вверх) в измеряемую среду трубопровода. В этих же целях необходимо размещать ИПД для жидких сред ниже уровня отбора давления, а для газовых сред – выше этого уровня. Если такие условия трудновыполнимы, то в соединительных линиях предусматривают газосборники со спусковыми клапанами (их функцию в ряде случаев могут выполнять уравнительные клапаны) или конденсатосборники с дренажными клапанами (вентильями) для периодического удаления побочной среды. Соединительные трубки должны быть защищены от переменных

воздействий внешних источников тепла или холода (за исключением естественного постоянного теплообмена с окружающей средой).

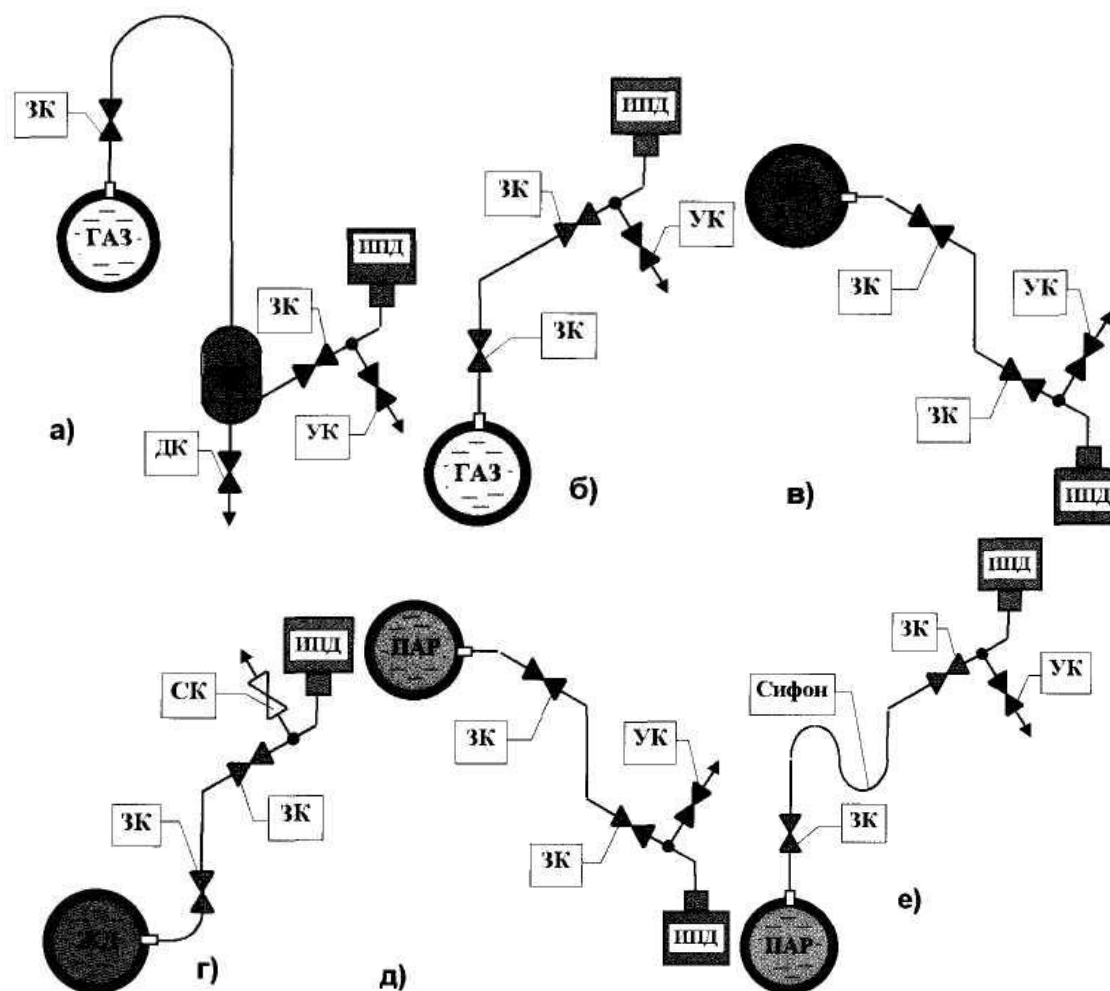


Рис. 1.18. Схемы установки ИПД (ДИ/ДА) на трубопровод для измерения давления газа, жидкости и пара при размещении ИПД ниже (а, в, д) или выше (б, г, е) уровня отбора давления:

ЗК – запорный клапан, УК – уравнильный клапан, СК – спусковой клапан, ДК – дренажный клапан, КС – конденсационный сосуд, ЖД – жидкость

При измерении давления водяного пара с использованием соединительных трубок невозможно избежать образования двухфазной среды в процессе охлаждения пара и передачи его давления через трубки на удалённый ИПД. Поэтому здесь ставится задача резкого перехода от пара к конденсату, который становится несжимаемой передающей разделительной средой. С этой целью передача давления осуществляется либо через трубку с сифоном (U-образным или кольцевым), в котором скапливается охлаждающийся конденсат, играющий роль водяного затвора, или через

трубку с уравнительным конденсационным сосудом, который поддерживает постоянный уровень конденсата в системе передачи давления пара (рис. 1.18 *д, е*). Особенно важно поддержание постоянства и равенства уровней конденсата в соединительных трубках при измерении дифманометром перепада давления пара на сужающем устройстве (диафрагме) в расходомерах переменного перепада давления (рис. 1.19).

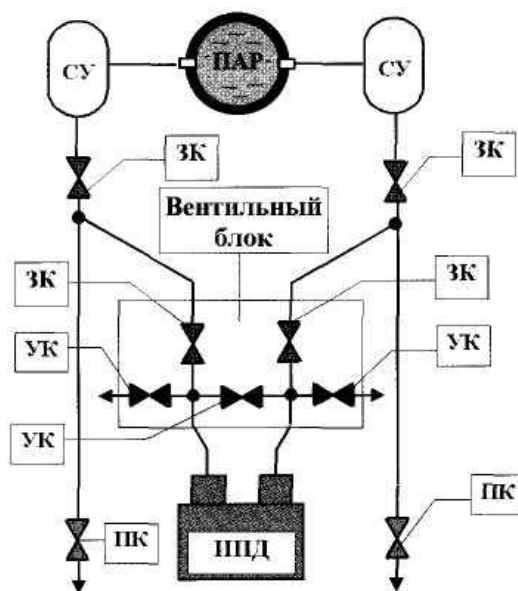


Рис. 1.19. Схема установки ИПД (ДД) на трубопровод для измерения давления пара при размещении ИПД ниже уровня отбора давления: ЗК – запорный клапан, ПК – продувочный клапан, УК – уравнительный клапан, СУ – сосуд уравнительный

В промышленных условиях измерение давлений энергоносителей необходимо производить как в расчетных, так и в технологических целях. Так, согласно российским «Правилам учета тепловой энергии и теплоносителей», действует требование регистрации давления сетевой (теплофикационной) воды в подающем и обратном трубопроводах на узле учета потребителя, причем это требование не связано с точностью учета теплоносителя (при обычном давлении вода несжимаема), а носит технологический характер – контроль режима теплотребления и обязательств энергоснабжающей организации. Аналогичные цели преследует измерение давления в трубопроводах холодного и горячего водоснабжения, в мазутопроводах. Вместе с тем измерение давления в трубопроводах газо- и пароснабжения принципиально важно, в первую очередь, для учета расхода и количества энергоносителя, а также соответствующего тепла (при учете перегретого пара без измерения давления не обойтись, а при учете

трубопроводу $D_y = 15$ мм с помощью гидронасоса центробежного типа с электрическим частотным приводом 11. Управление скоростью вращения вала электродвигателя (рабочего колеса центробежного гидронасоса) производится посредством частотного регулируемого преобразователя «MICROMASTER 420» 12. Также имеется линия перелива воды 20 для предотвращения аварийной ситуации (давление нагнетания гидронасоса может разрушить рабочую емкость). Уровень воды в рабочей емкости измеряется гидростатическим методом с помощью датчика 7 перепада давления «КЭР-АИП-НР-01», уровень в дренажном баке посредством датчика 10 перепада давления «КЭР-АИ-CD-01». В обвязку системы измерения уровня в рабочей емкости входят первичные 4, вторичные 6, перепускной 21 вентили и уравнивательный сосуд 17. Уравнивательный сосуд служит для исключения влияния общей высоты столба воды в рабочей емкости на отклонение уровня от нормального (на указательном стекле 16 обозначена как нулевая отметка). Установка технологических режимов лабораторного стенда осуществляется с помощью вентиля с ручным управлением 8, 9, 22, 23. Температура воды измеряется датчиком температуры Pt100. Управление технологическим процессом выполняется посредством локальной системы управления, состоящей из контроллера 18 типа SIMATIC C7-635K и персонального компьютера 19. Обмен информацией компьютера и контроллера осуществляется через USB/MPI-адаптер связи.

1.4. ДАТЧИКИ ДАВЛЕНИЯ «КЭР-АИП», «КЭР-АИ»

Датчики давления «КЭР-АИП-01» (рис. 1.21, а) и «КЭР-АИ-02» (рис. 1.21, б) предназначены для работы в системах автоматического контроля, регулирования и управления технологическими процессами и обеспечивают непрерывное преобразование измеряемых величин – давления избыточного, абсолютного, разрежения, давления-разрежения, разности давлений, гидростатического давления нейтральных и агрессивных сред в унифицированный токовый выходной сигнал дистанционной передачи, цифровой сигнал на базе *HART*-протокола.

Датчики «КЭР-АИ-02» имеет штуцерный тип подсоединения в отличие от «КЭР-АИП-01», который снабжен фланцевым подсоединением к технологическим коммуникациям (рис. 1.21).

Датчики разности давлений могут использоваться в устройствах, предназначенных для преобразования значения уровня жидкости, расхода жидкости, пара или газа в унифицированный токовый выходной сигнал, цифровой сигнал на базе *HART*-протокола.

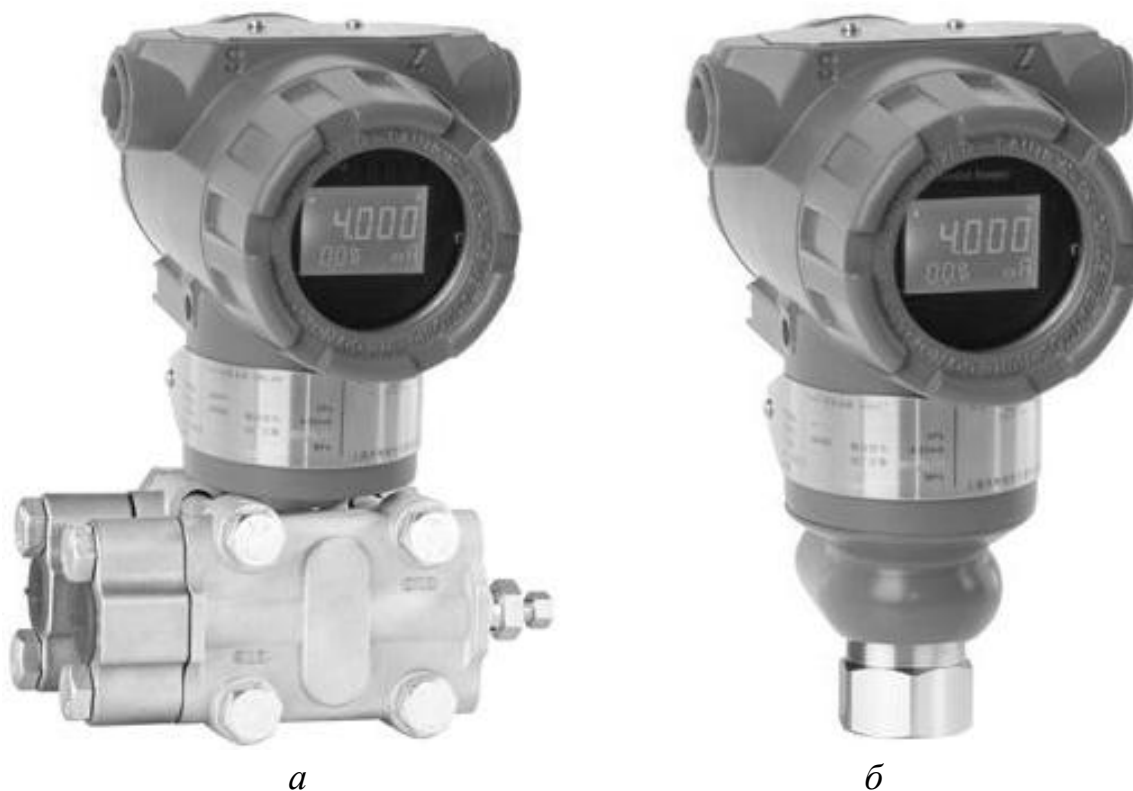


Рис. 1.21. Датчики давления «КЭР-АИП-01» (а) и «КЭР-АИ-02» (б)

Датчики предназначены для работы со вторичной регистрирующей и показывающей аппаратурой, регуляторами и другими устройствами автоматики, машинами централизованного контроля и системами управления, воспринимающими стандартные сигналы постоянного тока 4–20 мА, цифрового сигнала на базе *HART*-протокола. Датчики имеют выходной аналоговый сигнал постоянного тока 4–20 мА.

HART протокол принадлежит к системам *FSK* (*Frequency Shift Keying*), в которых несущая переключается сигналами с одной частоты на другую при неизменной амплитуде, был разработан компанией *Rosemount Inc.*

HART (*Highway Addressable Remote Transducer* – адресуемый дистанционный магистральный преобразователь) – протокол использует стандарт *BELL 202* кодировки сигнала методом *FSK* для обмена данными на скорости 1200 Бод; сигнал накладывается на аналоговый измерительный сигнал 4–20 мА. Поскольку среднее значение частотного сигнала равно нулю, цифровая связь не влияет на токовый сигнал (рис. 1.22).

Частотная модуляция помехоустойчива, поскольку искажению при помехах подвергается в основном амплитуда сигнала, а не частота.

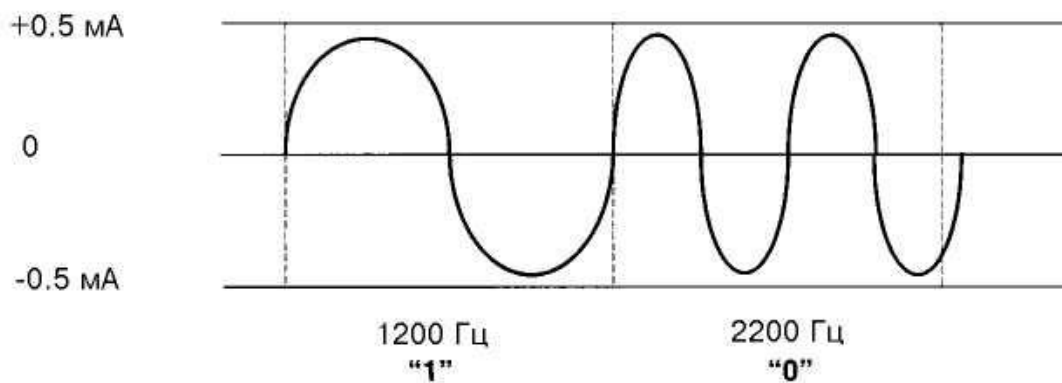


Рис. 1.22. Аналоговые и цифровые сигналы по *HART*-протоколу

Датчики с *HART*-протоколом могут передать информацию об измеряемой величине в цифровом виде по двухпроводной линии связи вместе с сигналом постоянного тока 4–20 мА. Этот цифровой сигнал может приниматься и обрабатываться любым устройством, поддерживающим протокол *HART*. Цифровой выход используется для связи датчика с портативным ручным *HART*-коммуникатором или с персональным компьютером через стандартный последовательный порт и дополнительный *HART*-модем; при этом может выполняться настройка датчика, выбор его основных параметров, перенастройка диапазонов измерений, корректировка «нуля» и ряд других операций. *HART*-протокол допускает в системе наличие двух управляющих устройств: системы управления и ручного коммуникатора. Эти два управляющих устройства имеют разные адреса и, следовательно, датчик КЭР может распознать и выполнить команды каждого из них. Таким образом, по двухпроводной связи передается два типа сигналов – аналоговый сигнал 4–20 мА и цифровой сигнал на базе протокола *HART*, который накладывается на аналоговый выходной сигнал датчика, не оказывая на него влияния.

Примеры записи обозначения датчика:

КЭР-АИП-01-CD-01-100 кПа – датчик перепада давления КЭР-АИП-CD, модель 01, с микропроцессорным электронным преобразователем, климатического исполнения ТЗ, для работы при температуре от минус 25 до плюс 70 °С, с пределом допускаемой основной погрешности 0,1, с верхним пределом измерений 100 кПа, с выходным сигналом 4–20 мА.

Технические характеристики представлены в табл. 1.

Наименование и обозначение датчика, модель датчика, максимальный верхний предел измерений или диапазон измерений модели P_{\min} , минимальный верхний предел измерений или диапазон измерений модели P_{\max} , верхние пределы измерений или диапазоны измерений по ГОСТ 22520-85 приведены в табл. 2.

Таблица 1

Измеряемая величина	Датчики общепромышленного назначения
Избыточное давление	КЭР-АИП-СГ-01
Абсолютное давление	КЭР-АИП-СА-01
Перепад давления	КЭР-АИП-СД-01
Перепад давления (при статическом давлении от 10 МПа)	КЭР-АИП-НР-01

Датчики КЭР-АИП являются многопределными и настраиваются на верхний предел измерений или диапазон измерений от P_{\min} до P_{\max} (табл. 2). Датчики могут быть настроены на верхний предел измерений или диапазон измерений по стандартному ряду давлений по ГОСТ 22520, или на верхний предел или диапазон измерений, отличающийся от стандартного, с перенастройкой диапазонов 100:1. При выпуске предприятием-изготовителем датчик настраивается на верхний предел измерений, выбираемый в соответствии с заказом из ряда значений, указанных в таблице 2.

Таблица 2

Наименование датчика	Датчик избыточного давления	Датчик абсолютного давления	Датчик перепада давления
Модель	КЭР-АИП-СГ	КЭР-АИП-СА	КЭР-АИП-СД-01 КЭР-АИП-НР-01
Минимальный нижний предел измерений P_{\min} (кПа)	1	38	1
Максимальный верхний предел измерений P_{\max} (МПа)	6,894	6,894	6.894
Ряд верхних пределов измерений или диапазонов измерений от P_{\min} до P_{\max} по ГОСТ 22520	1; 1,6; 2,5; 4; 6; 10; 16; 25; 40; 60; 100; 160; 250; 400; 600 (кПа); 1; 1,6; 2,5; 4; 6; 10 (МПа)	40; 60; 100; 160; 250; 400; 600 (кПа); 1; 1,6; 2,5; 4; 6; 10 (МПа)	1; 1.6; 2.5; 4; 6; 10; 16; 25; 40; 60; 63; 100; 160; 250; 400; 600; 630 (кПа)

Пределы допускаемой основной приведенной погрешности γ -датчиков, выраженные в процентах от нормирующего значения $\pm 0,1$ %. За нормирующее значение принимается верхний предел измерений входной измеряемой величины.

Дополнительная погрешность датчиков, вызванная изменением температуры окружающего воздуха в рабочем диапазоне температур, выраженная в процентах от диапазона изменения выходного сигнала, на каждые 10 °С не превышает значений указанных в табл. 3.

Таблица 3

Предел допускаемой основной погрешности	Дополнительная температурная погрешность на каждые 10 °С, $\pm \gamma$ %
0,1	$\pm \left(0,05 + 0,04 \frac{P_{\max}}{P_B} \right)$

Влияние вибрации на погрешность незначительно, за исключением резонансных частот. При резонансных частотах дополнительная погрешность, вызванная воздействием вибрации, не превышает $\pm (0,1 P_{\max})$ % на единицу перегрузки (g) от 10 до 2000 Гц в любом направлении, где: P_{\max} – максимальный верхний предел измерений.

Вариация выходного сигнала не превышает абсолютного значения допускаемой основной погрешности.

Датчики серии КЭР имеют линейно-возрастающую зависимость выходного сигнала от входной измеряемой величины (давления). Номинальная статическая характеристика датчика соответствует виду

$$I - I_H = \frac{I_B - I_H}{P_B - P_H} (P - P_H),$$

где: I – текущее значение выходного сигнала;

P – значение измеряемой величины;

I_B , I_H – соответственно верхнее и нижнее предельные значения выходного сигнала, равные: $I_B = 20$ мА, $I_H = 4$ мА;

P_B – верхний предел измерений;

P_H – нижний предел измерений.

Электрическое питание датчиков КЭР-АИП и КЭР-АИ с выходным сигналом 4 – 20 мА должно осуществляться от источника питания постоянного тока напряжением в диапазоне от 12 до 45 В. Пульсация выходного напряжения питания не должна превышать $0,5$ % от

номинального значения выходного напряжения при частоте гармонических составляющих, не превышающей 500 Гц.

Схемы внешних электрических соединений датчиков КЭР-АИП и КЭР-АИ приведены на рис. 1.23, 1.24.

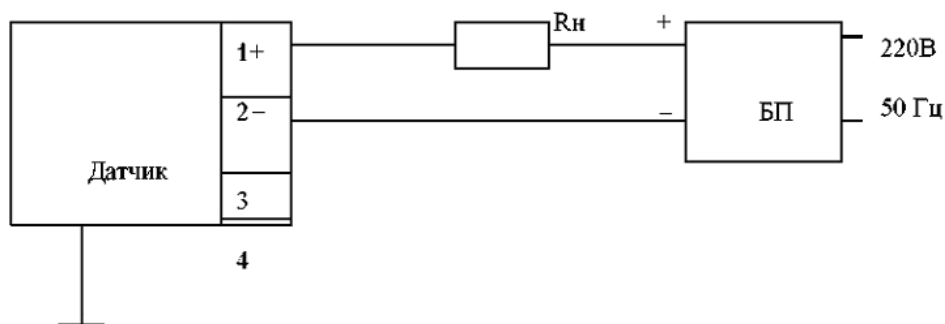


Рис. 1.23. Схема электрических соединений датчика с выходным сигналом 4–20 мА

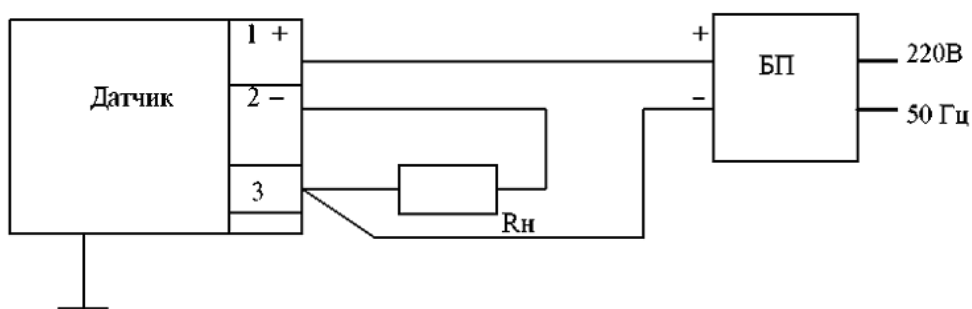


Рис. 1.24. Схема электрических соединений датчика с выходным сигналом 4–20 мА

Допускаемые нагрузочные сопротивления датчиков приведены в табл. 4.

Таблица 4

Выходной сигнал, мА	Напряжение питания, В	Сопротивление нагрузки	
		R_{\min} , Ом	R_{\max} , Ом
4–20	10,5–55	$R_{\min} = 0$ при $U_{\text{п}} = 36$ В Для работы по HART- протоколу $R_{\min} = 250$ Ом при напряжении питания от 16,25 до 55 В	$R_{\max} = 43,5(U_{\text{п}} - 10,5)$
Примечание: $U_{\text{п}}$ – напряжение питания датчика, В			

Пределы допустимого напряжения питания в зависимости от нагрузочного сопротивления приведены на рис. 1.25. Следует иметь в виду, что связь HART требует нагрузки не ниже 250 Ом и не выше 1100 Ом.

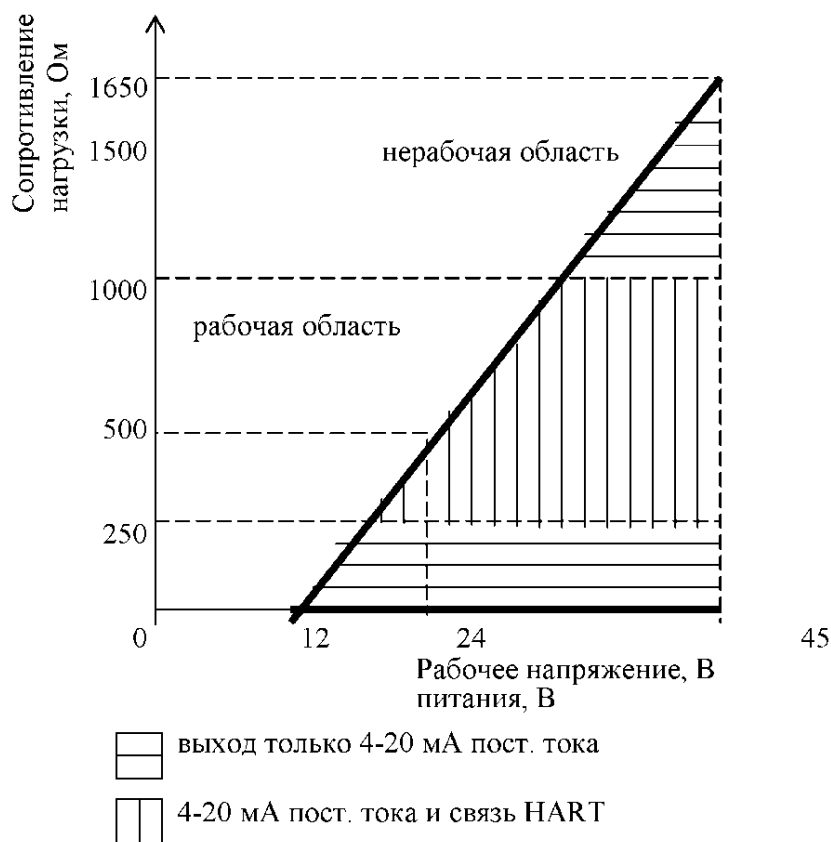


Рис. 1.25. Пределы допустимого напряжения питания в зависимости от нагрузочного сопротивления

Потребляемая мощность датчика не превышает 1,0 ВА для датчиков с выходным сигналом 4–20 мА. Датчики устойчивы к воздействию атмосферного давления от 84,0 до 106,7 кПа (группа Р1 по ГОСТ 12997). Датчики устойчивы к воздействию температуры окружающего воздуха, от минус 25 °С до плюс 70 °С (по ГОСТ 15150). Датчики исполнения Т3 по ГОСТ 15150 устойчивы к воздействию относительной влажности окружающего воздуха 100 % при температуре плюс 35 °С и более низких температурах с конденсацией влаги. Степень защиты датчиков от воздействия пыли и воды соответствует группе IP65 по ГОСТ 14254. По устойчивости к механическим воздействиям датчики соответствуют виброустойчивому исполнению V3 по ГОСТ 12997.

Датчики предназначены для измерения давления, перепада давления, по отношению к которым материалы, контактирующие с измеряемой средой, являются коррозионно-стойкими (сталь 12Х18Н10Т, сплав ВТ-9).

Пульсация выходного сигнала в диапазоне частот от 0,06 до 5 Гц не должна превышать основной приведенной погрешности. Пульсация выходного сигнала в диапазоне частот от 5 до 10 Гц не должна превышать 1,5 % от диапазона изменения выходного сигнала для выходного сигнала 4–20 мА. Пульсация выходного сигнала с частотой свыше 10 Гц не нормируется. Пульсация выходного сигнала нормируется при нагрузочном сопротивлении 250 Ом.

В режиме измерения давления и перепада давления датчики обеспечивают постоянный контроль своей работы и формируют сообщение о неисправности в виде уменьшения выходного сигнала ниже значения 3,7 мА.

Датчики выдерживают воздействие перегрузки испытательным давлением, указанным в таблице 5, в течение 15 мин.

Таблица 5

Наименование датчиков	Верхний предел измерений, МПа	Испытательное давление в процентах от максимального верхнего предела измерений
Датчик избыточного давления	до 10	125
Датчик абсолютного давления	от 0,25 и более	125
Датчик перепада давления	до 10	125
Датчик перепада давления	до 32	125

Влияние изменения статического давления может вызвать отклонение «нуля» в пределах $\pm (0,05 \% P_{\max})/6,9$ МПа при давлении в линии от 0 до 13,7 МПа и может быть устранено калибровкой «нуля». Отклонение диапазона $\pm 0,1$ % от измеряемого диапазона.

Изменение монтажного положения не влияет на выходной сигнал, соответствующий верхней границе диапазона измерений. Отклонение нуля составляет до 0,311 кПа. В любом варианте смещение нуля может быть устранено калибровкой.

Влияние напряжения источника питания менее $\pm 0,005$ % на 1 В от диапазона изменения выходного сигнала.

Датчики обеспечивают возможность настройки на смещенный диапазон измерений с установкой начального значения выходного сигнала (смещение «нуля») при значении измеряемого параметра в пределах от нуля до $P_{\text{н}} = P_{\text{max}} - P_{\text{min}}$,

где: P_{max} – максимальный диапазон измерений модели (табл. 2);

P_{min} – минимальный диапазон измерений для датчиков данной модели(табл. 2).

При указанных выше настройках верхний предел (диапазон) измерений не должен превышать максимального значения для данной модели.

Предельные значения (уровни ограничения) выходного сигнала в диапазоне измеряемых давлений, разности давлений приведены в таблице 6.

Таблица 6

Выходной сигнал, мА	Предельные значения выходного сигнала, мА	
	Нижнее	Верхнее
4-20	$3,76 \pm 0,02$	$21,76 \pm 0,16$

Время включения датчика, измеряемое как время от включения питания датчика до установления аналогового выходного сигнала с погрешностью не более 5 % от установившегося значения, не более 1,8 с при отключенном усреднении выходного сигнала (на индикаторе отображается время усреднения 0,2 с).

Датчики имеют два режима работы:

- 1) режим измерения давления (перепада давления);
- 2) режим установки и контроля параметров измерения.

На дисплее индикатора датчика КЭР или HART-коммуникатора в режиме измерения давления отображается величина измеряемого давления в цифровом виде, в установленных при настройке единицах измерения или в процентах от диапазона изменения выходного сигнала.

Датчики в соответствии с ГОСТ 27.003 относятся к изделиям конкретного назначения, вида I, непрерывного длительного применения, восстанавливаемым, ремонтируемым.

Средняя наработка на отказ датчика с учетом технического обслуживания, регламентируемого настоящим руководством по эксплуатации, составляет 150000 ч.

Средний срок службы датчиков составляет не менее 12 лет, кроме датчиков, эксплуатируемых при измерении параметров агрессивных сред, средний срок службы которых зависит от свойств агрессивной среды, условий эксплуатации.

Масса датчиков КЭР-АИП-01 не более 3,6 кг. Вентильный блок не более 2,5 кг.

Устройство и работа

Конструктивно датчик состоит из корпуса 1, мембранного емкостного преобразователя 2 и электронной монтажной платы 3 (рис. 1.26).

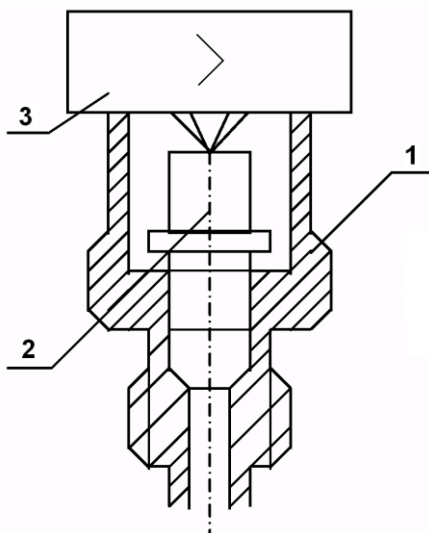


Рис. 1.26. Конструкция датчика

Измерительная часть датчиков серии КЭР состоит из двух основных частей: сенсора и электронной монтажной платы, предназначенных для преобразования давления, перепада давления в сигнал 4–20 мА постоянного тока.

В датчиках серии КЭР-АИП используется сенсорный модуль на базе емкостной ячейки. Давление через разделительную мембрану и заполняющую жидкость передается на измерительную мембрану, расположенную между пластинами конденсатора. Под воздействием измеряемого давления мембрана прогибается и в результате изменяется электрическая емкость ячеек, образованных сенсорной мембраной и пластинами конденсатора. Разделительная мембрана представляет собой лист плотного упругого элемента, используемый для измерения давления; его смещение пропорционально давлению с максимальным смещением 0,10 мм.

Генерируемый электрический сигнал преобразуется в цифровой и передается на микроконтроллер (рис. 1.27).

Аналого-цифровой преобразователь (АЦП) используется для преобразования давления (перепада давления) на чувствительном элементе в цифровой сигнал, пропорциональный измеряемому давлению для передачи в микропроцессор (рис. 1.20).

Датчик температуры необходим для измерения температуры сенсора давления (перепада давления) с целью коррекции выходного сигнала при работе датчика в условиях эксплуатации.

Энергонезависимое перепрограммируемое запоминающее устройство (ЭСППЗУ) сохраняет в памяти данные по температурной компенсации

датчика, калибровочную информацию точной цифровой настройки. В случае отключения питания данные сохраняются в памяти.

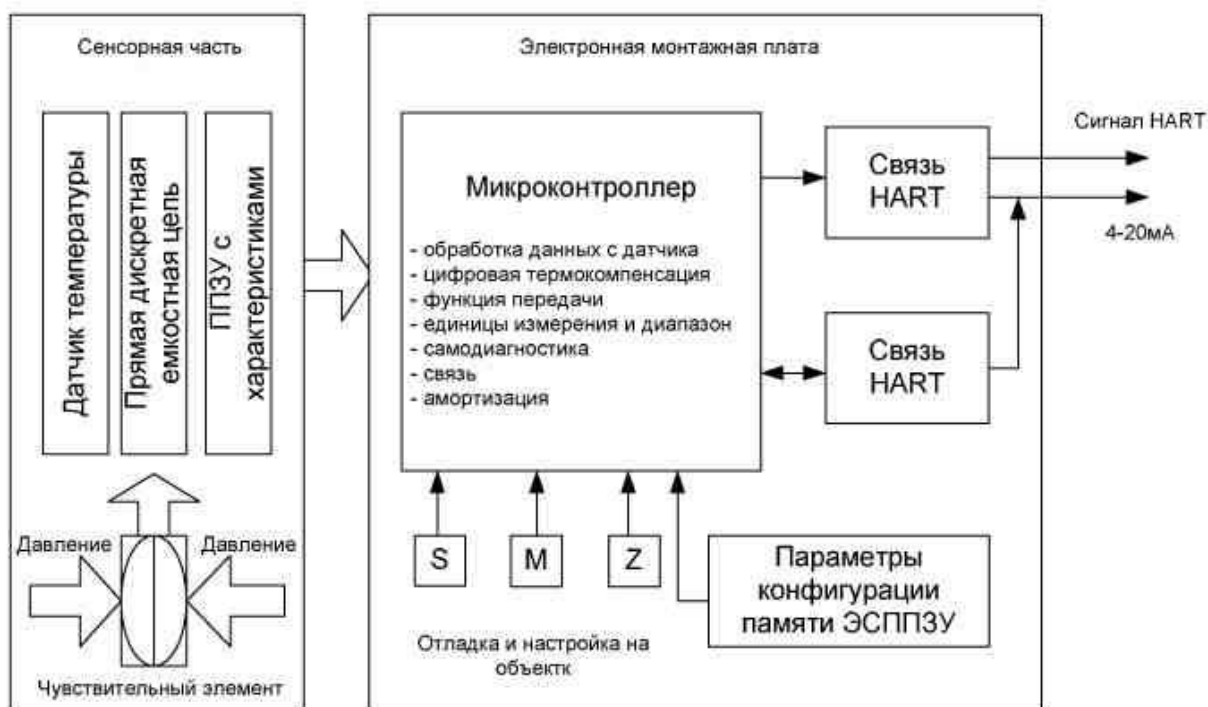


Рис. 1.27. Блок-схема измерительной части датчика

Микропроцессор, конструктивно расположенный на электронной монтажной плате, обрабатывает информацию, полученную из АЦП, вычисляет истинные значения давления (перепада давления) и преобразует в напряжение. При математической обработке используется калибровочная и температурная информация, хранящаяся в ЭСППЗУ. Далее преобразованное напряжение передается в цифро-аналоговый преобразователь (ЦАП), который формирует выходной унифицированный токовый сигнал, и в секцию связи протокола *HART*.

Программное обеспечение датчика обеспечивает возможность пользователю, используя доступ по *HART*-протоколу, провести конфигурирование, диагностику и калибровку датчика.

С помощью функции конфигурирования можно установить рабочие параметры датчика:

- Давление (перепад давления) в точках 4 и 20 мА;
- значение времени демпфирования (от 0 до 36 с – по выбору пользователя);
- физические единицы измеряемых параметров;
- сообщение 32 алфавитно-цифровых знаков;

- дата и др. параметры.

Кроме этих конфигурационных параметров в программном обеспечении датчика содержится информация, которая не может быть изменена пользователем: тип датчика, пределы сенсора, минимальная шкала, заполняющая жидкость, изоляционные материалы, серийный номер модуля и номер версии программного обеспечения.

Датчик проводит непрерывную самодиагностику. При возникновении неисправности датчик активизирует предупредительный сигнал, выбираемый пользователем.

Коммуникатор *HART* или система управления могут затем запросить датчик о характере неисправности. Датчик выдает информацию для выполнения корректирующих действий. Если оператор считает, что неисправность возникла в цепи, датчик может быть настроен на выдачу специального выходного сигнала для тестирования цепи.

Датчик имеет жидкокристаллический индикатор, который отображает в цифровом виде значения измеренных параметров в физических единицах или в процентах от аналоговой шкалы; кроме этого, отображает диагностические сообщения о неисправностях.

1.5. ЧЕЛОВЕКО-МАШИННЫЙ ИНТЕРФЕЙС ЛАБОРАТОРНОГО СТЕНДА

Операторская рабочая станция – это устройство в системе автоматического управления (САУ), которое позволяет наблюдать и контролировать текущее состояние системы, управлять технологическим процессом. Операторская рабочая станция способна отображать видеogramмы, которые позволяют общаться с технологическими процессами, использующими другие устройства. Кроме того, можно отслеживать и контролировать аварийные ситуации, просматривать и вводить информацию о технологических параметрах. Исходя из целей и задач создания системы, могут быть реализованы информационные, управляющие, регистрирующие и диагностические функции.

В состав лабораторной системы автоматического управления входят контроллер, рабочая станция и принтер.

Контроллер SIMATIC C7-635K обеспечивает ввод всех сигналов с датчиков и арматуры, преобразование и обработку полученных сигналов по заданному алгоритму и выдачу управляющих воздействий на исполнительные механизмы. На контроллере выполнены все подсистемы, реализующие задачи контроля, управления, регулирования и защит.

Рабочая станция представляет собой персональный компьютер в комплекте с цветным 19" монитором, клавиатурой и «мышью». Рабочая станция позволяет контролировать технологические параметры, положение регулирующей арматуры, текущее состояние системы, управлять технологическим процессом посредством приборов управления, отображаемых на дисплее рабочей станции. Кроме того, рабочая станция позволяет контролировать аварийное и предаварийное состояние технологических параметров, просматривать изменение параметров во времени в графическом и цифровом виде, а также просматривать архивы изменения параметров и формировать отчеты.

Рабочая станция совмещает в себе функции станции инжиниринга и, при входе в систему с правами администратора, позволяет производить перенастройку системы и вносить необходимые изменения и дополнения.

Управляющие функции:

- дистанционное управление запорно-регулирующей арматурой и механизмами;
- управление состоянием и режимами работы регуляторов;
- квитирование (съем мигания) аварийной, предупредительной и диагностической сигнализации.

Информационные функции:

- Сбор и отображение оперативной информации в виде графиков, гистограмм и текстовых сообщений на экране видеомонитора;
- регистрация аварийных ситуаций, включая срабатывание защиты, формирование протокола аварийной ситуации и вызов на печать;
- регистрация, архивирование и вызов на печать значений параметров;
- сигнализация отклонений значений параметров и превышения скорости изменения значений параметров.

Диагностические функции:

- Контроль достоверности показаний датчиков;
- диагностика каналов связи между контроллерами и рабочими станциями;
- диагностика состояния модулей ввода/вывода и работы контроллера.

Вызов мнемосхем и дополнительных приложений.

Человеко-машинный интерфейс САУ состоит из окон мнемосхем («Graphics»), окна графиков («Trend»), окна информации о точках («Point Information»). Доступ к любому окну можно получить, используя соответствующие иконки программ, расположенные на рабочем столе монитора.

Для вызова программы необходимо дважды щелкнуть левой кнопкой мыши на нужной иконке.

Перечень программ, доступных оператору:

- «Alarms» (Сигнализация) – журнал аварийных сообщений;
- «Graphics» (Мнемосхемы) – окно отображения мнемосхем;
- «Point Information» (Информация о сигналах) – информация о технологических параметрах;
- «Trend» (Тренд) – графики переходных процессов;

Работа с мнемосхемами (приложение «Graphics»).

Основной программой, используемой для отображения технологических видеogramм, контроля состояния параметров, управления режимами работы регуляторов и дистанционного управления исполнительными механизмами, является «Graphics» (Мнемосхемы).

После вызова этой программы двойным щелчком мыши на соответствующей иконке на рабочем столе монитора появляется обзорное окно системы, используемое для дальнейшего выбора необходимой мнемосхемы. Эта мнемосхема является навигатором по системе и имеет статус основной («домашней») мнемосхемы. Поэтому она всегда загружается первой при вызове очередного окна.

Окно отображения мнемосхем содержит несколько областей отображения информации (рис. 1.28):

- 1 – поле обращений;
- 2 – дата и время;
- 3 – параметр – уровень в рабочей емкости;
- 4 – окно управления насосом;
- 5 – параметр – температура в рабочей емкости;
- 6 – параметр – расход в рабочую емкость;
- 7 – клавиши выбора мнемосхемы – графики (тренды);
- 8 – управление насосом;
- 9 – управление регулирующим клапаном;
- 10 – параметр – уровень в дренажной емкости.

Отображение аналоговых параметров. На экране монитора рабочей станции аналоговые параметры отображаются следующим образом (рис. 1.29):

- наименование параметра;
- индикация числового значения параметра (цифры с неровными краями свидетельствуют о плохой связи с датчиком);
- состояние параметра (характеризуется цветом).

Наименования технологических параметров:

- Т – температура;
- Н – уровень;
- G – расход.

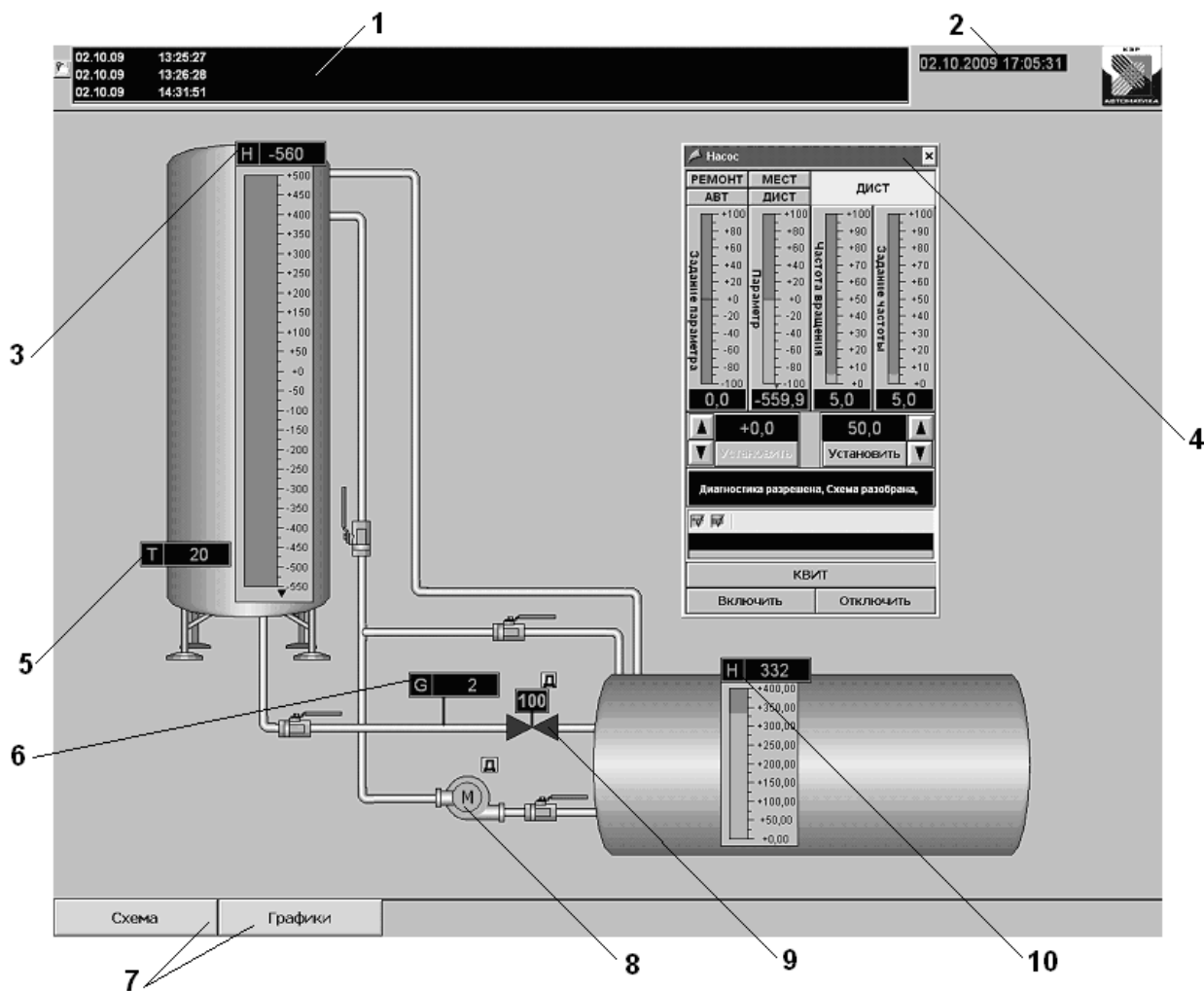


Рис. 1.28. Окно мнемосхемы



Рис. 1.29. Отображение аналоговых параметров

В зависимости от состояния переменной, цвет состояния данных переменных бывает следующих цветов:

- цвет текста значения – зеленый – параметр в норме;
- цвет текста значения – красный – выход текущего значения параметра за границы предаварийной сигнализации;
- цвет текста значения – желтый – выход текущего значения переменной за границы предупредительной сигнализации;
- цвет фона значения – красный – срабатывание диагностики по недостоверному значению переменной (обрыв, перегрузка, выход текущего

значения за диапазон измерения, отказ или отключение модуля ввода/вывода, отсутствие связи по каналу связи с УСО).

Ошибка в привязке аналогового параметра, или отсутствие связи с контроллером приводят к закрашиванию цифрового значения серой сеткой.

Все факты отклонений сопровождаются выдачей соответствующих сообщений, звуковой сигнализацией и регистрацией в журнале событий и аварийных сообщений.

Щелчком левой кнопкой «мыши» по любой позиции аналогового ввода на экране одной из мнемосхем системы управления будет открыто окно управления аналоговым параметром (рис. 1.30). Открывшиеся окна можно перемещать по экрану в удобное место, они остаются при смене мнемосхемы. Для отключения окна управления надо нажать на **×** в правом верхнем углу окна. Например, при нажатии на позиции параметра на экране появится следующее окно с отображёнными на нем параметрами для данной позиции (рис. 1.30). Параметры также могут отображаться в виде трендов.



Рис. 1.30. Окно аналогового параметра (уровня)

Для просмотра оперативного архива используются графики, вызываемые щелчком правой клавиши мыши на поле вывода аналогового параметра (рис. 1.31).

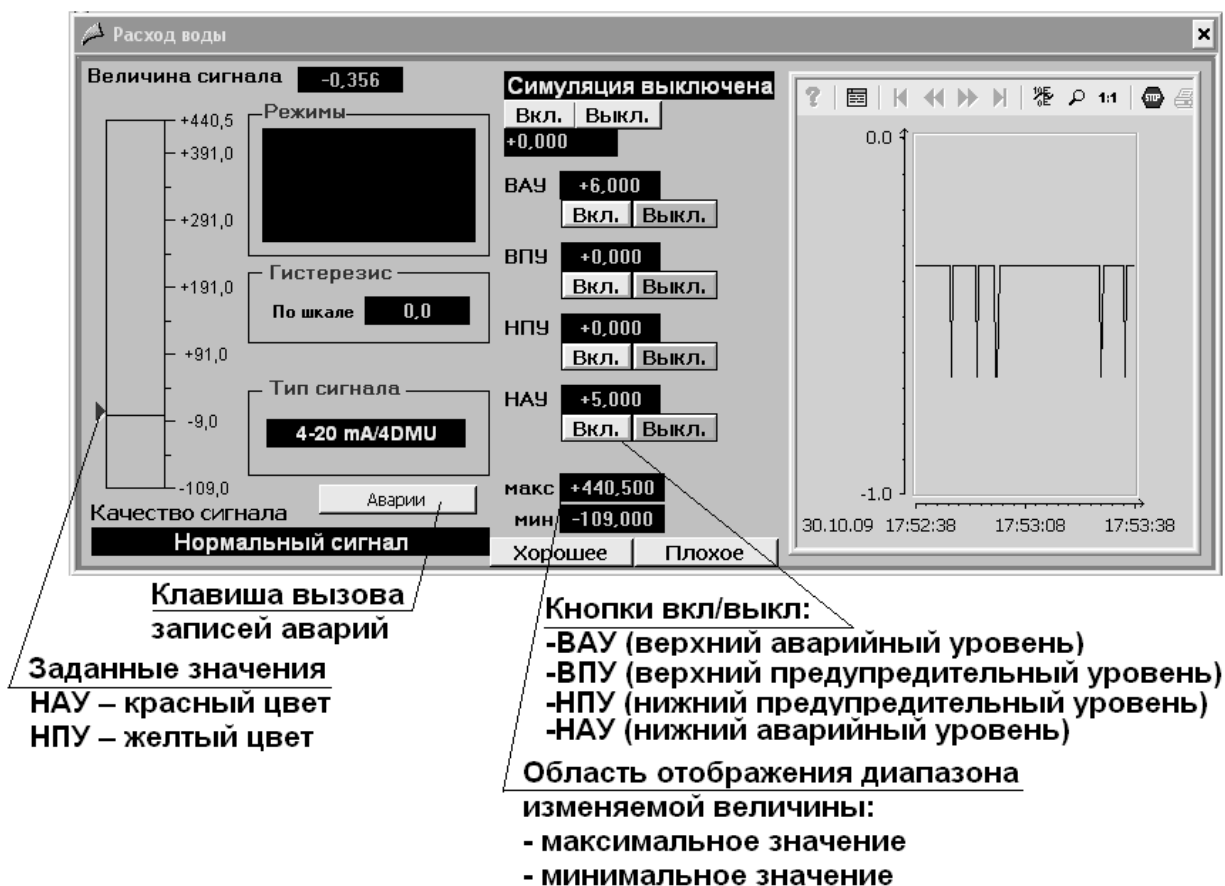


Рис. 1.31. Расширенное окно аналогового параметра (расхода)

Отображение дискретных параметров. Состояние регулируемого клапана отображается на мнемосхемах цветом. Состояние режима работы, статуса системы, аварий отображается в виде текстовых сообщений, появляющихся на экране в зависимости от состояния дискретного параметра.

Управление регулятором. Блок (рис. 1.32) используется для наблюдения за состоянием регулятора. В полях этого блока отображаются:

- позиция регулятора,
- цветовое отображение его состояния (серый – разобран, зеленый – закрыт, красный – открыт, мигающий зеленый – закрытие, мигающий красный – открытие),
- значение положения регулятора в %,
- состояние системы управления
- наличие аварий.

При нажатии левой кнопки мыши на изображении регулятора будет открыто окно его состояния и управления, при этом выбранный регулятор выделяется рамкой красного цвета. В окне управления регулятором могут отображаться поля, индикаторы и кнопки управления (рис. 1.33).

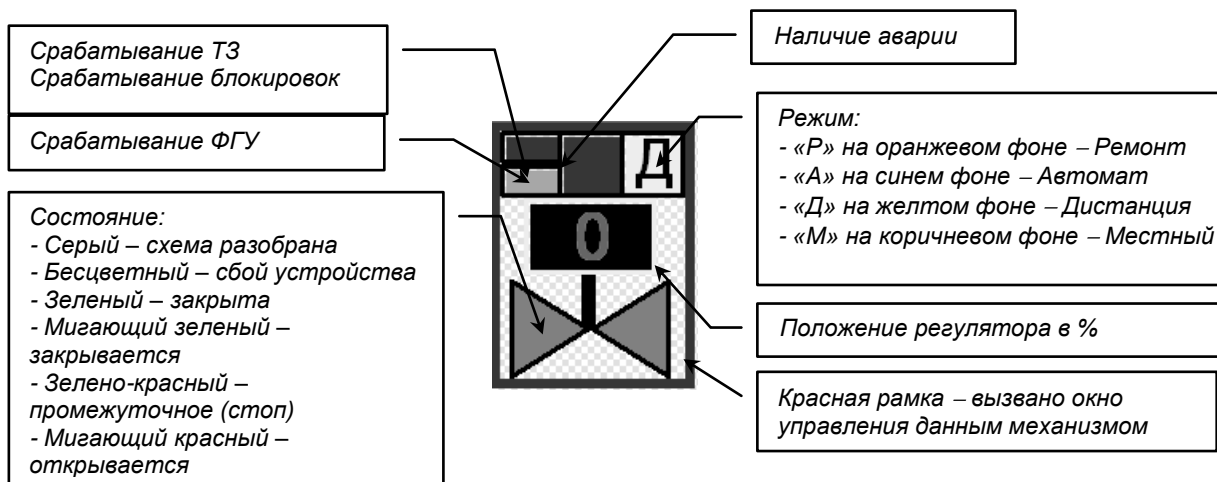


Рис. 1.32. Регулирующий клапан

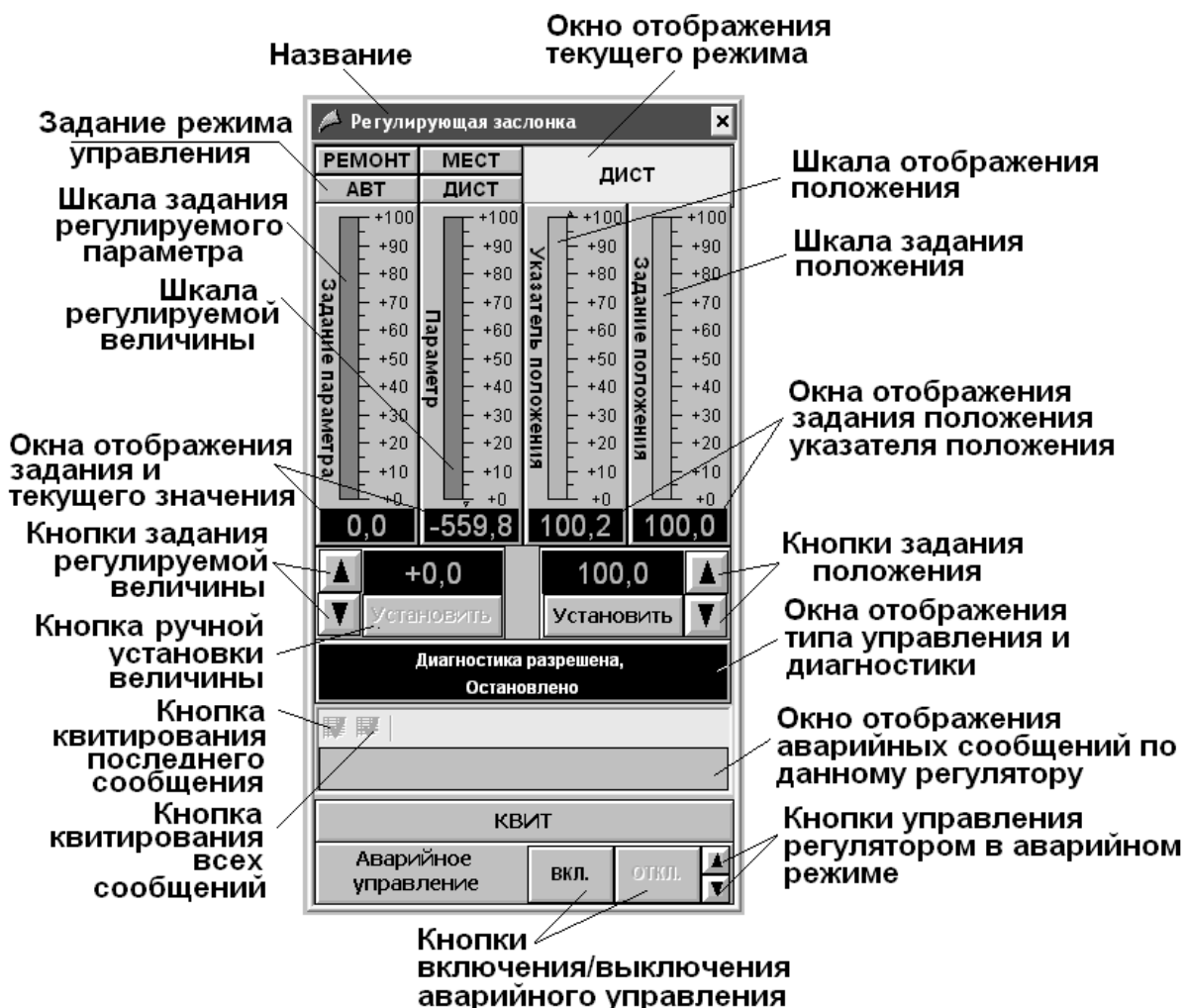


Рис. 1.33. Окно регулирующего крана

При появлении аварий по данному регулятору на панели индикации аварий высвечивается сообщение, при этом отключается все управление на данном приборе.

Кнопка «Квит» предназначена для квитирования аварийной сигнализации по данному регулятору и восстановления управления.

Кнопки управления регулятором предназначены для подачи команд на изменение положения регулятора.

Кнопки «АВТ», «МЕСТ», «ДИСТ» и «РЕМОНТ» предназначены для изменения режима управления:

- автоматический – регулятор управляется автоматикой;
- местный – регулятор управляется со шкафа управления операторами вручную;
- дистанционный – регулятор управляется из диспетчерской операторами вручную;
- ремонт – регулятор не управляется, находится в ремонте.

При нажатии правой кнопки мыши на изображении регулятора будет открыто расширенное окно его состояния и управления, при этом выбранный регулятор выделяется рамкой красного цвета (рис. 1.34).

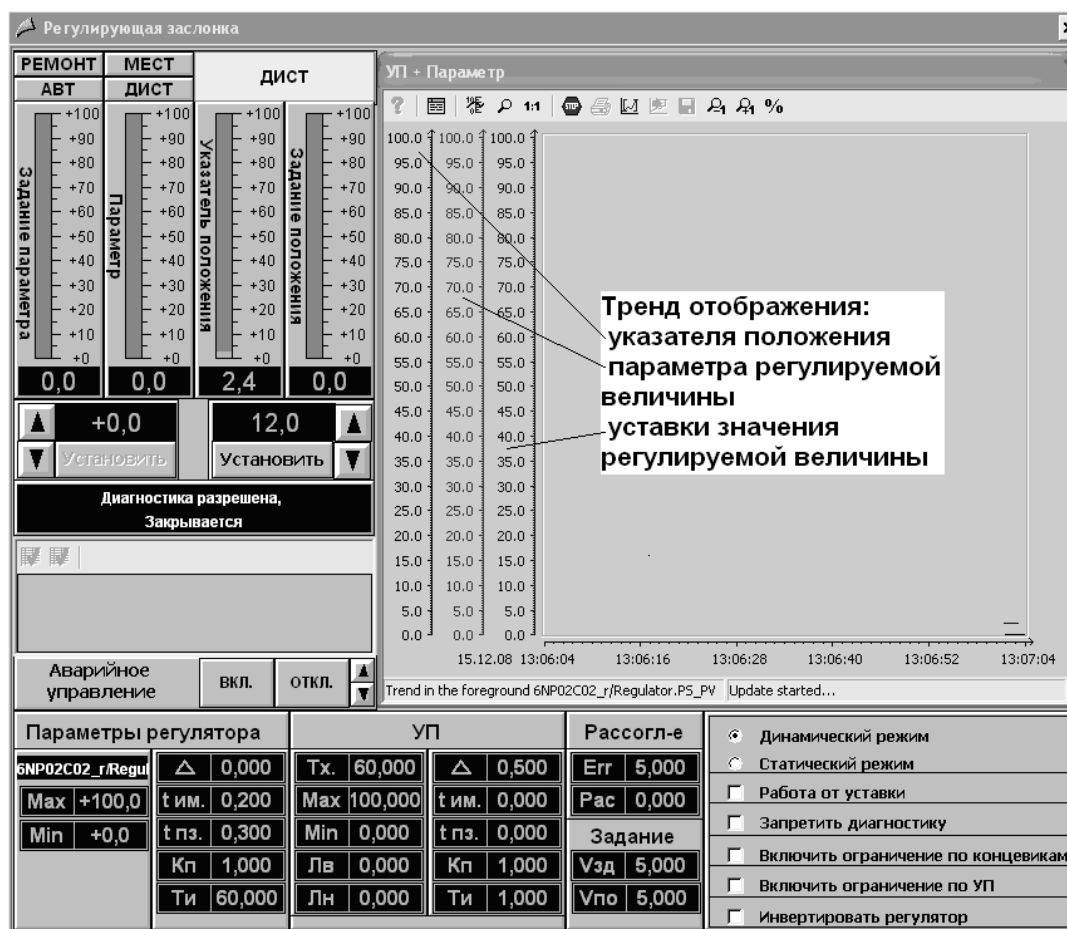


Рис. 1.34. Расширенное окно управления регулирующим краном

Аналогичные окна можно вызвать для управления гидронасосом с частотно-регулируемым приводом (рис. 1.35, 1.36).



Рис. 1.35. Окно регулирования частоты насоса

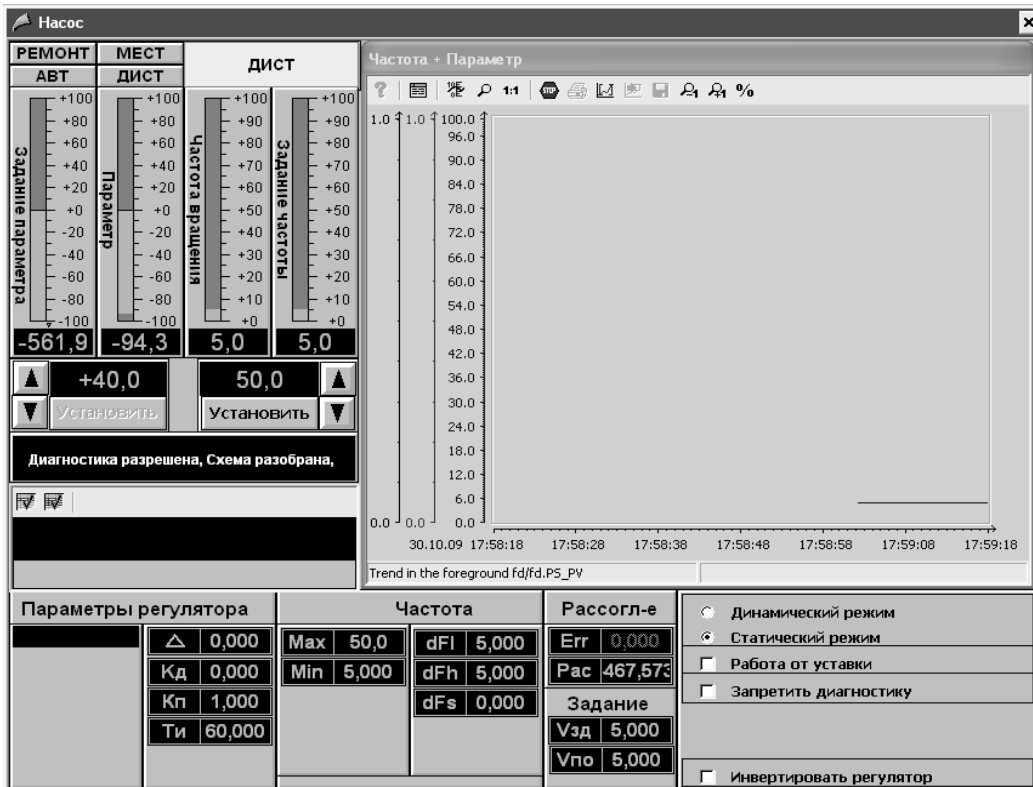


Рис. 1.36. Расширенное окно управления насосом

1.6. МЕТОДИКА ВЫПОЛНЕНИЯ ПОВЕРКИ ГИДРОСТАТИЧЕСКОГО УРОВНЕМЕРА

1. Убедится, что уравнильный сосуд 13 заполнен водой, краны 4, 8, 23 (рис. 1.37) открыты, кран 9 (рис. 1.37) закрыт.

2. Включить лабораторный стенд (рис. 1.37), для чего проверить подключение стенда к сети 220 В; нажать кнопку включения ИБП 6 и перевести автоматические выключатели 1 в положение «включено» (верхнее положение), проверить рабочее состояние контроллера 2, в случае необходимости включить. Дождаться полной загрузки рабочей станции и программы управления на базе контроллера.

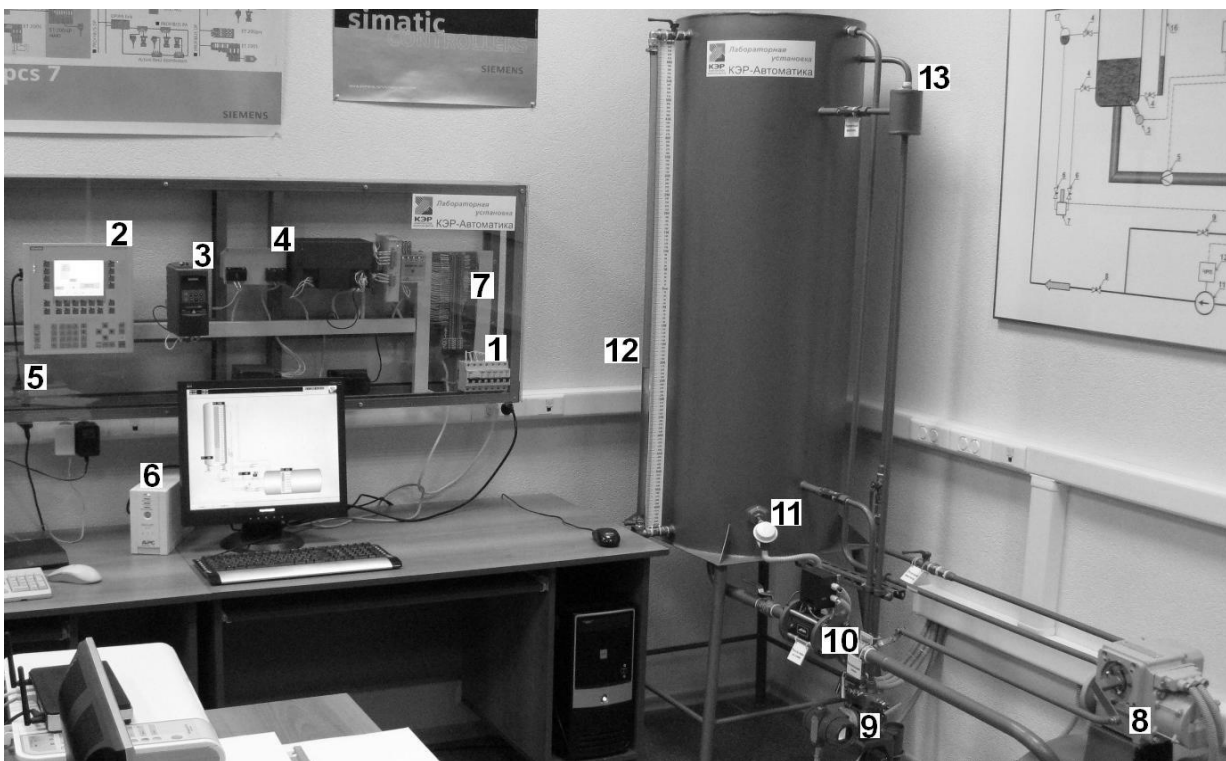


Рис. 1.37. Лабораторный стенд

3. Получить у преподавателя поверяемые отметки уровня. Записать заданные отметки в таблицу наблюдений 7.

4. Установить регулирующий кран в полностью закрытое состояние, для чего вызвать его окно (рис. 1.33, 1.34), включить аварийный дистанционный режим управления, установить задатчиком положение 0 %.

5. Задать расход подачи воды в рабочую емкость 0,15 л/с, для чего вызвать окно управления гидронасосом (рис. 1.35, 1.36); включить аварийный дистанционный режим управления, установить задатчиком частоту 30 Гц. В рабочей емкости уровень воды должен начинать

повышаться. При отсутствии повышения уровня обратиться к персоналу кафедры или преподавателю.

Таблица 7

Показания гидростатического уровнемера, мм	Показания по водомерному стеклу, мм		Основная абсолютная погрешность гидростатического уровнемера, мм		Вариация показаний, мм
	прямой ход	обратный ход	прямой ход	обратный ход	

6. Вызвать окно отображения уровня в рабочей емкости (рис. 1.30). При достижении уровнем первой (нижней) заданной отметки остановить гидронасос и произвести отсчет показаний по водомерному стеклу. Результаты записать в таблицу наблюдений.

7. Повторить действия, представленные в п. 5 и п. 6 для заданных отметок. Результаты записать в таблицу наблюдений в графу прямого хода.

8. Проверить отключенное состояние гидронасоса по окну отображения (рис. 1.35, 1.36), в случае рабочего состояния отключить гидронасос.

9. Установить регулирующий кран в положение 20 %. В рабочей емкости уровень воды должен начать понижаться. При отсутствии понижения уровня обратиться к персоналу кафедры или преподавателю.

10. Вызвать окно отображения уровня в рабочей емкости (рис. 1.30). При достижении уровнем предпоследней (верхней) заданной отметки закрыть регулирующий кран и произвести отсчет показаний по водомерному стеклу. Результаты записать в таблицу наблюдений.

11. Повторить действия, представленные в п. 9 и п. 10 для следующих заданных отметок. Результаты записать в таблицу наблюдений в графу обратного хода.

12. По окончании опытов выключить рабочую станцию, дождаться конца всех программ и перевести автоматические выключатели 1 в положение «выключено».

1.7. ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ОПЫТОВ

1. Определить основную абсолютную погрешность на каждой отметке для прямого и обратного хода по формуле

$$\Delta = H_{ГС} - H_{ВМ}, \text{ мм},$$

где $H_{ГС}$ – показание гидростатического уровнемера;

$H_{ВМ}$ – показание водомерного стекла;

2. Определить вариацию на каждой отметке для прямого и обратного хода по формуле

$$\beta = H_{ОХ} - H_{ПХ}, \text{ мм},$$

где $H_{ОХ}$ – показание водомерного стекла на обратном ходе;

$H_{ВМ}$ – показание водомерного стекла на прямом ходе;

3. Определить максимальную приведенную относительную погрешность по формуле

$$\delta_{пр} = \frac{\Delta_{\max}}{(N_{к} - N_{н})} \cdot 100 \%,$$

где Δ_{\max} – максимальная по модулю абсолютная погрешность;

$N_{к}$ – конечная отметка шкалы гидростатического уровнемера;

$N_{н}$ – начальная отметка шкалы гидростатического уровнемера;

4. Записать вывод о максимальной абсолютной по модулю, приведенных погрешностях и вариации.

1.8. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

Отчет должен содержать следующее: дату заполнения, номер и наименование работы, результаты поверки уровнемера в виде таблицы, выводы по работе.

1.9. ЗАДАНИЕ НА САМОСТОЯТЕЛЬНУЮ РАБОТУ

1. Изучить методы и средства измерения уровня жидкости и сыпучих веществ.
2. Изучить методы и средства измерения давления.

1.10. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Дайте пояснения к схемам измерения уровня гидростатическим методом для открытой емкости, барабана котла с различными уравнительными сосудами.
2. Охарактеризуйте параметр давления, дайте классификацию методов и средств измерения давления.
3. Дайте пояснения к схемам измерения давления.

4. Объясните общую схему и принцип действия гидравлической системы замкнутого типа.

5. Объясните схему и принцип действия датчиков давления КЭР-АИП-01 и КЭР-АИ-02.

6. Дайте характеристику датчикам давления КЭР-АИП-01 и КЭР-АИ-02.

7. Как определяется абсолютная погрешность гидростатического уровнемера?

8. Как определяется вариация показаний гидростатического уровнемера?

2. Лабораторная работа № 2

ИЗУЧЕНИЕ СИСТЕМЫ ИЗМЕРЕНИЯ РАСХОДА ЖИДКОСТИ НА ОСНОВЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО РАСХОДОМЕРА-СЧЕТЧИКА «ВЗЛЕТ ЭР»

Цель работы:

- ознакомиться с системами измерения расхода;
- изучить электромагнитный расходомер-счетчик «ВЗЛЕТ ЭР»;
- провести поверку градуировки расходомера-счетчика «ВЗЛЕТ ЭР» по водомерному стеклу.

2.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ ОБ ИЗМЕРЕНИИ РАСХОДА. РАСХОДОМЕРЫ ВИХРЕВЫЕ, ПОСТОЯННОГО ПЕРЕПАДА ДАВЛЕНИЯ, ТАХОМЕТРИЧЕСКИЕ, ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ, УЛЬТРАЗВУКОВЫЕ И ПЕРЕМЕННОГО ПЕРЕПАДА ДАВЛЕНИЯ

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

Расход есть количество вещества, протекающего через сечение трубопровода в единицу времени.

Количество вещества можно измерять либо в единицах массы [килограмм (кг), тонна (т)], либо в единицах объема [кубический метр (м^3), литр (л)]. В соответствии с выбранными единицами может производиться измерение либо массового расхода Q_M (единицы кг/с, кг/ч, т/ч и т.д.), либо объемного расхода Q_0 (единицы $\text{м}^3/\text{с}$, л/с, $\text{м}^3/\text{ч}$ и т.д.). Единицы массы дают более полные сведения о количестве или расходе вещества, чем единицы объема, так как объем вещества, особенно газов, зависит от давления и температуры. При измерении объемных расходов газов для получения сопоставимых значений

результаты измерения приводят к определенным (так называемым нормальным) условиям. Такими нормальными условиями принято считать температуру $t_H = 20 \text{ }^\circ\text{C}$, давление $p_H = 101325 \text{ Па}$ (760 мм рт. ст.) и относительную влажность φ . В этом случае объемный расход обозначается Q_H и выражается в объемных единицах (например, $\text{м}^3/\text{ч}$, но не $\text{нм}^3/\text{ч}$).

В соответствии с ГОСТ-15528 измерительный прибор, служащий для измерения расхода вещества, называется **расходомером**, а прибор для измерения количества вещества – **счетчиком количества** (счетчиком). В каждом конкретном случае к этим терминам следует добавлять наименование контролируемой среды.

Существует большое разнообразие методов измерения расхода и конструктивных разновидностей расходомеров и счетчиков.

Наибольшее распространение получили следующие разновидности расходомеров: 1) вихревые; 2) постоянного перепада давления (относятся к общей группе расходомеров обтекания); 3) тахометрические; 4) электромагнитные; 5) ультразвуковые; 6) переменного перепада давления с сужающими устройствами (относятся к общей группе расходомеров переменного перепада).

Вихревые расходомеры

Данные измерители расхода основаны на измерении частоты вихрей, возникающих в потоке среды, и обеспечивают дискретный выходной сигнал, прямо пропорциональный объемному расходу. Известны также расходомеры на базе свободных колебаний, так называемой вихревой дорожке Кармана, а также на основе вынужденных колебаний закрученного потока.

Принцип действия. При помещении твердого тела в поток жидкости возникают завихрения, известные под названием вихревой дорожки Кармана в виде буквы Δ , поэтому иногда такие расходомеры называют *дельтаметрами*. В устройстве, показанном на рис. 2.1, в поток помещен цилиндр, за которым образуются периодически срывающиеся вихри.

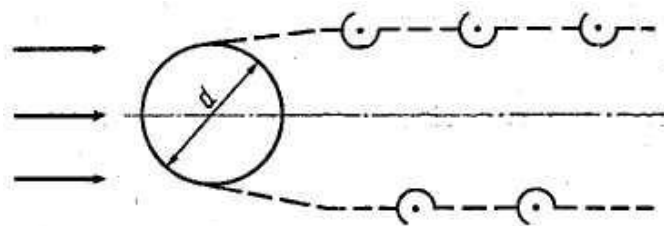


Рис. 2.1. Схема образования вихрей за помещенное в поток тело

Для исследования характеристик вихревых расходомеров наряду с числом Рейнольдса Re служит число или критерий Струхалия Sh , характеризующий периодические процессы, связанные с движением жидкости или газа. Этот критерий для обтекания потоком воздуха бесконечно длинного цилиндра (струны), при числах Рейнольдса, превышающих 70, имеет вид

$$Sh = \frac{fd}{v},$$

где f – частота пульсаций давления газа (или жидкости) в результате периодического срыва вихрей;

d – диаметр цилиндра (характерный размер);

v – скорость потока.

Для получения линейной шкалы вихревого расходомера надо, чтобы число Sh оставалось постоянным в возможно большем диапазоне чисел Re . Число Струхалия Sh остается неизменным в достаточно широком диапазоне чисел Рейнольдса (рис. 2.3), скорость потока может быть определена путем измерения частоты вихрей. В общем случае число Струхалия является функцией числа Рейнольдса $Sh = f(Re)$, так что строгой пропорциональности между частотой вихрей f и диаметром цилиндра d в произвольно широком диапазоне не существует. Изменяя форму обтекаемого потоком тела (рис. 2.2) и соотношение между его размерами и размерами канала, по которому протекает поток, можно обеспечить постоянство числа Струхалия и его независимость от числа Рейнольдса в достаточно широком диапазоне (рис. 2.3).

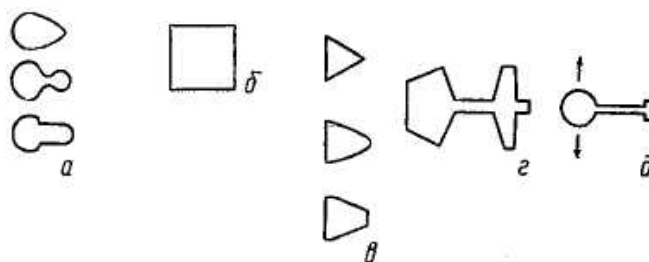


Рис. 2.2. Сечения ($a-d$) помещаемых в поток тел:
 $б$ – параллелепипед с экспериментально определенным оптимальным соотношением сторон

Иногда кроме числа Sh применяют еще и число Росби Ro – отношение осевой и тангенциальной составляющих скорости:

$$Ro = \frac{v}{\omega d},$$

где ω – угловая скорость.

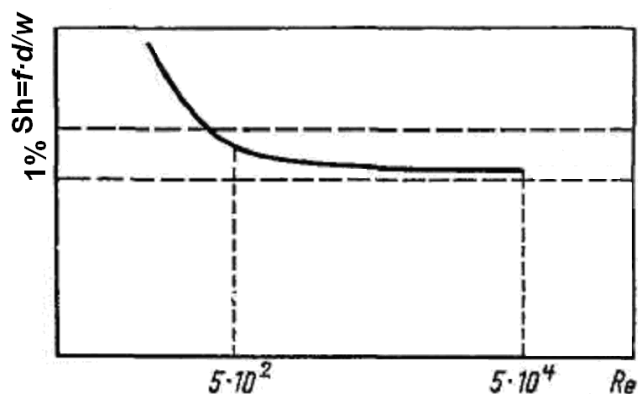


Рис. 2.3. Зависимость числа Струхалия от числа Рейнольдса для помещенного в свободное течение цилиндра

Числа Sh и Ro связаны зависимостью $Sh = f/\omega Ro$, из которой следует, что Sh остается постоянным, если постоянны число Ro и отношение f/ω .

Преобразователи расхода у этих расходомеров многоступенчатые. В первой ступени в процессе вихреобразования или осцилляции струи создаются пульсации давления и скорости, частота которых пропорциональна объемному расходу. Во второй ступени эти пульсации преобразуются в выходной сигнал, обычно электрический. Для этого служат преобразователи давления (пьезоэлементы), температуры (термоанемометры), напряжения (тензорезисторы), ультразвуковые преобразователи скорости и т.п.

Работу вихревых расходомеров могут нарушать акустические и вибрационные помехи, создаваемые различными источниками: насосами и компрессорами, местными сопротивлениями, завихрителями, вибрирующими трубами и т.д. Если частота вредных пульсаций отличается от частоты измерительного сигнала, то ее влияние можно устранить с помощью электрических фильтров. Сложнее их устранить, если эти частоты совпадают. Иногда применяют струевыпрямитель на выходном патрубке преобразователя расхода. Для борьбы с помехами целесообразно иметь два преобразователя (например, два пьезоэлемента), включенных встречно и установленных в точках, где пульсации полезного сигнала находятся в противофазе, а пульсационные помехи в фазе. При этом полезные сигналы усиливаются, а помехи в значительной мере устраняются. Термопреобразователи менее чувствительны к помехам, чем преобразователи давления. Вибрации не отражаются на их показаниях, но механически они менее прочны.

У вихревых расходомеров много достоинств: отсутствие подвижных частей, простота и надежность преобразователя расхода, независимость показаний от давления и температуры, большой диапазон измерения, достигающий в некоторых случаях до 15–20, линейность шкалы, хорошая

точность (погрешность $\pm 0,5-1,5\%$), частотный измерительный сигнал, стабильность показаний, сравнительная несложность измерительной схемы, возможность получения универсальной градуировки. К недостаткам вихревых расходомеров относятся значительная потеря давления, достигающая 30–50 кПа, и некоторые ограничения возможности их применения: они непригодны при малых скоростях из-за трудности измерения сигнала, имеющего малую частоту, и изготавливаются лишь для труб, имеющих диаметры от 25 до 150–300 мм. Применение их для больших труб затруднительно, а при очень малых диаметрах нет устойчивого вихреобразования. Они не применяются также при $Re < 10^3 \div 10^4$. Многие конструкции вихревых расходомеров непригодны и для измерения загрязненных и агрессивных веществ, могущих нарушить работу преобразователей выходного сигнала. Но на процессе вихреобразования загрязнение, коррозия и эрозия тела обтекания или закручивающего аппарата практически сказываются очень мало (в отличие, например, от сужающих устройств). Поэтому при выборе преобразователя выходного сигнала (например, ультразвукового) вихревые расходомеры могут служить и для измерения загрязненных, агрессивных и абразивных веществ.

Вихревой расходомер с закрученным потоком. При этом методе измерения расходов в контролируемом потоке создаются вращательные завихрения, перемещающиеся в направлении движения потока и воспринимаемые преобразователем, конструкция которого выполнена без каких-либо подвижных частей.

Вращающийся поток создается установленными на входе расходомера направляющими пластинками и распространяются по конусу в направлении движения потока (рис. 2.4). Встроенный в стенку расходомера терморезистор выдает импульсы, частота которых пропорциональна скорости потока и которые поступают затем в электронный блок. На выходе расходомера установлен механический струевыпрямитель, устраняющий вращение потока.

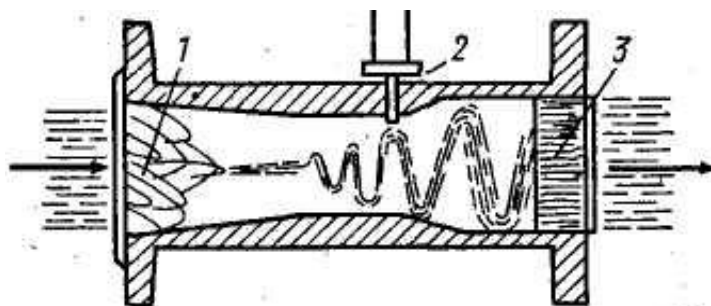


Рис. 2.4. Принцип действия вихревого расходомера:

- 1 – струезакручивающее устройство; 2 – чувствительный элемент;
3 – струевыпрямитель

Так как при постоянстве числа Sh частота f пропорциональна v , то, измеряя эту частоту, можно судить о скорости v , а значит, и об объемном расходе потока. Для получения линейной шкалы вихревого расходомера надо, чтобы число Sh оставалось постоянным в возможно большем диапазоне чисел Re .

Ротаметры

Ротаметры используются для измерения небольших объемных расходов жидкостей (верхние пределы измерения ротаметров по воде находятся в пределах от 0,04 до 16 м³/ч) или газов (верхние пределы измерения ротаметров по воздуху находятся в пределах от 0,063 до 40 м³/ч) в вертикальных трубопроводах диаметром 4 ÷ 100 мм.

В простейшем виде ротаметр представляет собой вертикальную коническую (расходящуюся вверх) стеклянную трубку 1 (рис. 2.5), внутри которой располагается поплавок 2. Поплавки могут иметь различную форму. Одной из форм является цилиндрическая с нижней конической частью и верхним бортиком с вырезанными на нем косыми канавками. Контролируемая среда при протекании через эти канавки обеспечивает вращение поплавка, при этом он центрируется по оси трубки и устраняется его трение о стенки.

Между бортиком поплавка и стенкой трубки образуется кольцевой зазор f_k , при прохождении через который жидкость сужается и, таким образом, возникает разность между давлением p_1 в сечении AA до начала сужения и давлением p_2 в самом узком сечении BB кольцевой струи. С подъемом поплавка площадь f_k увеличивается, что в случае неизменного расхода приведет к уменьшению разности $p_1 - p_2$. Принцип действия ротаметра основан на уравнивании при любом расходе силы тяжести поплавка силами, действующими на него со стороны жидкости. При этом вертикальное положение поплавка будет однозначно связано с расходом.

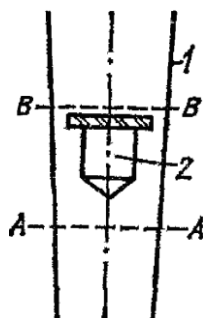


Рис. 2.5. Схема ротаметра

Рассмотрим подробнее силы, действующие на поплавков. На поплавков, имеющий объем V , наибольшее сечение f , среднюю плотность $\rho_{\text{п}}$, сверху вниз действует сила тяжести:

$$G = V_{\text{п}} g.$$

Снизу вверх на поплавков действует:

1) сила, обусловленная разностью статических давлений $p_1 - p_2$, возникающая вследствие ускорения потока в кольцевом зазоре между стенкой и поплавком, $F = (p_1 - p_2) f$;

2) динамический напор $W = \varphi (v^2/2)$, где φ – коэффициент сопротивления поплавка, зависящий от его формы; ρ – плотность среды; v – ее скорость в сечении AA ;

3) сила трения потока о боковую поверхность поплавка $N = kv_k^n f_{\sigma}$, где k – коэффициент, зависящий от числа Рейнольдса и степени шероховатости поплавка; v_k – средняя скорость потока в кольцевом зазоре; n – показатель степени, зависящий от скорости; f_{σ} – площадь боковой поверхности поплавка.

Поплавков будет неподвижно висеть в потоке жидкости или газа, если будет соблюдаться равенство сил, действующих на него сверху и снизу:

$$G = (p_1 - p_2) f + W + N. \quad (1)$$

Отсюда можно получить уравнение:

$$p_1 - p_2 = (G - W - N)/f. \quad (2)$$

Если пренебречь силами W и N , то можно записать:

$$p_1 - p_2 = G/f, \quad (3)$$

т.е. перепад давления на поплавке оказывается не зависящим от расхода (в действительности из-за увеличения W и N перепад с увеличением расхода несколько уменьшается). Поэтому ротаметры относятся к группе расходомеров постоянного перепада. Действие ротаметра можно пояснить, используя выражение (3).

Предположим, что при исходном расходе Q_0 поплавков занимает исходное положение, характеризующееся площадью кольцевого зазора f_{k1} . При этом на поплавков действует перепад $p_1 - p_2$, при котором выполняется равенство (3). При увеличении расхода в первый момент положение поплавка и f_k неизменны, в силу чего $p_1 - p_2$ начнет увеличиваться. При этом нарушается равенство (3) и поплавков начнет подниматься вверх. При этом f_k будет увеличиваться (из-за конусного профиля трубки), что приведет к уменьшению $p_1 - p_2$. Подъем поплавка будет осуществляться до тех пор, пока вновь не восстановится равенство (3). Очевидно, что любому расходу будет соответствовать определенная площадь f_k кольцевого зазора, т.е.

определенное положение поплавка. Уравнение, связывающее Q_0 и f_k , обычно записывается в виде, аналогичном уравнению расхода для расходомеров переменного перепада:

$$Q_0 = \alpha f_k \sqrt{2gv(\rho_{\text{п}} - \rho)/(\rho f)} \quad (4)$$

Из (3) следует также, что положение поплавка зависит не только от расхода, но и от плотности контролируемой среды, т.е. градуировка ротаметра должна производиться с ее учетом. Из-за большого разнообразия контролируемых сред ротаметры подразделяются на две группы: для жидкостей, которые градуируются на воде, и для газов, которые градуируются на воздухе. Погрешность ротаметров может быть уменьшена в 2–3 раза индивидуальной градуировкой.

Материал поплавков: сталь, алюминий, бронза, эбонит, пластмассы – не должен подвергаться коррозии в контролируемой среде. Ротаметры обладают рядом достоинств: простота устройства; возможность измерения малых расходов и на трубопроводах малых диаметров; практически равномерная шкала.

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

Тахометрические расходомеры

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

Тахометрические преобразователи расхода могут использоваться как в счетчиках количества, так и в расходомерах. В первом случае преобразователь расхода (например, турбинка) связан со счетным механизмом. Тахометрические расходомеры содержат электрические тахометрические преобразователи частоты вращения чувствительного элемента в электрический сигнал, измеряемый затем показывающим прибором. Такие электрические преобразователи скорости оказывают незначительное тормозящее действие на подвижный элемент (по сравнению с механической передачей в счетчиках), в силу чего точность тахометрических расходомеров выше точности счетчиков с механическим редуктором. Тахометрические приборы измеряют объемные расходы. При

необходимости измерения массовых расходов они должны снабжаться плотномерами и вычислительным устройством.

Тахометрические расходомеры применяются для измерения расхода различных жидкостей (реже газов), причем некоторые их разновидности могут использоваться на загрязненных жидкостях.

Погрешность измерения и потери статического давления на расходомере зависят от расхода и вязкости жидкости. Поэтому важными техническими данными таких приборов являются минимальный измеряемый расход (нижний предел измерения) и потеря давления на них.

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

На рис. 2.6, *a* схематично показано устройство турбинного преобразователя расхода жидкости. Корпус преобразователя 1 представляет собой отрезок трубы с двумя фланцами для присоединения его к трубопроводу. Внутри корпуса установлены струевыпрямители 2 и 3, соединенные неподвижной осью, на которой расположена турбинка 4. В расходомерах частота вращения турбинки, пропорциональная объемному расходу, с помощью тахометрического преобразователя 5 (рис. 2.6, *a*) преобразуется в частоту выходного напряжения и затем с помощью специальной схемы – в аналоговый выходной сигнал. В счетчиках количества частота вращения турбины, пропорциональная количеству протекшего вещества, измеряется счетным механизмом, соединенным с осью турбинки шестеренчатым редуктором и магнитной муфтой.

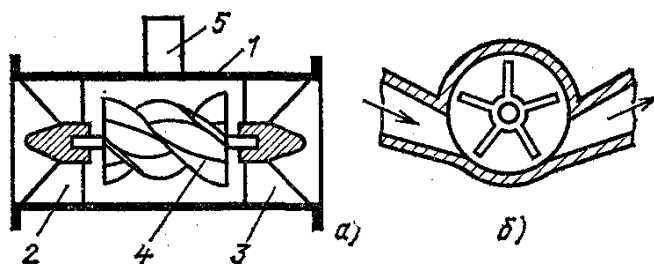


Рис. 2.6. Турбинные преобразователи расхода:
a – с аксиальной турбиной; *б* – с тангенциальной турбинкой

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

Аксиальные турбинки имеют лопасти винтовой формы (на рис. 2.6, *a* показана четырехлопастная турбинка). При малом диаметре турбинок число лопастей мало (4–6), но они имеют большую длину. При больших диаметрах турбинки число лопастей велико (до 20), но их высота и длина невелики (относительно диаметра).

Конструкции тангенциальных турбинок разнообразны. В качестве примера на рис. 2.6, *б* показана турбинка серийно выпускаемых одноструйных водосчетчиков.

При незначительных нагрузках на турбинку ее частота вращения ω пропорциональна объемному расходу Q_0 , однако на характер этой зависимости влияют вязкость ν и плотность ρ измеряемой среды, момент сопротивления M_c от трения в опорах и реакции тахометрического преобразователя частоты вращения (поз. 5 на рис. 2.6, *a*) или механического счетчика, конструктивные параметры турбинки.

Серийно выпускаемые расходомеры имеют основную погрешность 0,5 %. Эта погрешность может быть уменьшена индивидуальной градуировкой.

Достоинством турбинных расходомеров является возможность измерения расходов в широком диапазоне ($5 \cdot 10^{-9}$ – $2 \text{ м}^3/\text{с}$) на трубопроводах диаметром 4–750 мм при давлениях до 250 МПа и температурах от –240 до +700 °С, а также большой диапазон измерения. При больших скоростях и диаметрах труб диапазон измерения $Q_{\text{вп}}/Q_{\text{мин}}$ достигает 15–20, при малых скоростях и малых диаметрах труб 5–10. Кроме того, такие расходомеры обладают малой инерционностью.

Однако тахометрические турбинные расходомеры имеют и недостатки, ограничивающие их применение: влияние вязкости контролируемой среды, износ опор (нельзя, например, измерять расход сред, содержащих взвешенные частицы, особенно если они обладают абразивными свойствами).

Электромагнитные расходомеры

Принцип действия электромагнитных расходомеров основан на законе электромагнитной индукции, в соответствии с которым в электропроводной жидкости, пересекающей магнитное поле, индуцируется ЭДС, пропорциональная скорости движения жидкости. Серийные электромагнитные расходомеры предназначены для измерения расхода жидкостей с электропроводностью не менее 10^{-3} См/м (соответствует электропроводности

водопроводной воды). Имеются специальные расходомеры, позволяющие измерять расход жидкостей с электропроводностью до 10^{-5} См/м.

На рис. 2.7, а показана принципиальная схема электромагнитного расходомера. Корпус 1 преобразователя, изготовленный из немагнитного материала и покрытый изнутри электрической изоляцией 2 (резиной, эмалью, фторопластом и т.д.), расположен между полюсами магнита (на рис. 2.7, а изображен постоянный магнит). Через стенку трубы изолированно от нее по диаметру введены электроды 3, находящиеся в электрическом контакте с жидкостью. Силовые линии магнитного поля направлены перпендикулярно плоскости, проходящей через ось трубы и линию электродов.

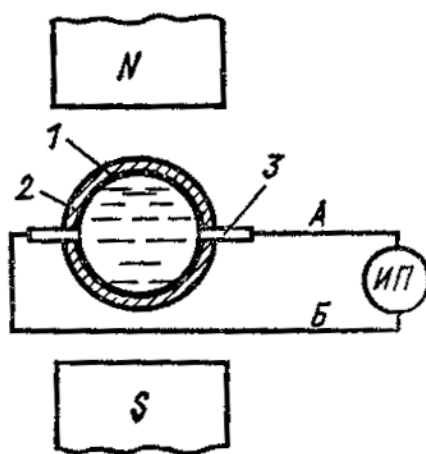


Рис. 2.7. Электромагнитный расходомер с внешним магнитом

В соответствии с законом электромагнитной индукции при осесимметричном профиле скоростей в жидкости между электродами будет наводиться ЭДС:

$$E = BDv,$$

где B – индукция магнитного поля;

v – средняя скорость жидкости;

D – длина жидкостного проводника, равная диаметру трубы. Учитывая, что $Q_0 = \pi D^2/4$, получаем

$$E = 4BQ_0/(\pi D).$$

Отсюда следует, что ЭДС E прямо пропорциональна измеряемому объемному расходу. Измерение наведенной ЭДС осуществляется измерительным прибором (ИП), к которому предъявляются жесткие требования по значению его входного сопротивления $Z_{\text{вх}}$. Для обеспечения малого влияния внутреннего сопротивления преобразователя $Z_{\text{вн}}$ необходимо выполнение соотношения:

$$Z_{\text{и}}/Z_{\text{п}} = 100 \div 500. \quad (5)$$

Внутреннее сопротивление преобразователя растет с уменьшением электропроводности жидкости, что вызывает необходимость увеличения $Z_{\text{и}}$, однако этому препятствует емкостное сопротивление соединительных проводов, включенных параллельно $Z_{\text{п}}$. Поэтому необходимость выполнения условия (5) накладывает ограничения на минимальную электропроводность измеряемой жидкости.

Применение постоянных магнитов в расходомерах позволяет облегчить борьбу с помехами от внешних электромагнитных полей, увеличить быстродействие прибора. Основным недостатком их использования является поляризация электродов: концентрация у положительного электрода отрицательных ионов, а у отрицательного положительных. Вследствие этого на границах электродов создаются ЭДС, которые в сумме образуют ЭДС поляризации, направленную против основной измеряемой ЭДС, что изменяет градуировочную характеристику прибора и делает невозможной его стабильную работу. Поэтому электромагнитные расходомеры с постоянным магнитным полем не применяются для жидкостей с ионной проводимостью. Широкое распространение они получили для измерения расхода расплавленных металлов, в которых отсутствует явление поляризации. Типичная область применения таких расходомеров – ядерные энергетические установки с жидкометаллическим теплоносителем.

Для измерения расхода сред с ионной проводимостью применяются расходомеры с переменным магнитным полем, создаваемым электромагнитом (рис. 2.8).

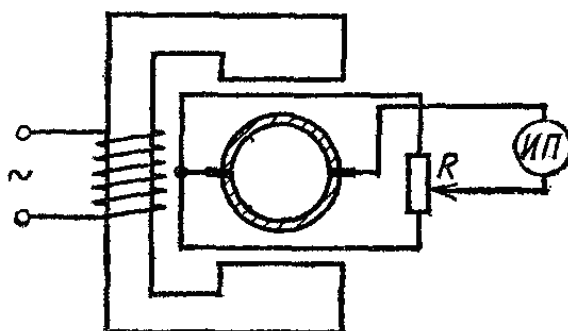


Рис. 2.8. Расходомер с переменным магнитным полем

При синусоидально изменяющейся магнитной индукции, имеющей амплитудное значение $B_{\text{м}}$ и частоту f , выражение для ЭДС имеет вид:

$$E = 4B_{\text{м}}Q_0[\sin(2\pi ft)](\pi D) \quad (6)$$

При достаточно высокой частоте f поляризация электродов практически отсутствует, однако использование переменного магнитного поля имеет свои недостатки. Наиболее серьезным из них является появление паразитной трансформаторной ЭДС E_T . Эта ЭДС наводится рабочим магнитным полем $B = B_M \sin(2\pi ft)$ в контуре (рис. 2.7) провод A – электрод – жидкость – электрод – провод B – вход измерительного прибора ИП. В соответствии с законом электромагнитной индукции:

$$E_T = -\frac{d\Phi}{dt} = -S \frac{dB}{dt} = -2\pi f S B_M \cdot \cos(2\pi ft), \quad (7)$$

где Φ – магнитный поток, пронизывающий контур; S – площадь проекции контура, пронизываемого магнитным полем, на плоскость, проходящую через ось трубы и линию электродов.

Электромагнитные расходомеры имеют много достоинств. Они могут применяться на трубопроводах практически любых диаметров без ограничения верхнего предела по расходу. Их показания не зависят от вязкости и плотности среды. Шкала прибора линейная, диапазон измерения обычно равен $(0,1 \div 1) \cdot Q_{\text{вп}}$. Преобразователь расхода практически безынерционный, не имеет частей, выступающих внутрь трубы, и, таким образом, практически не создает потери давления. Влияние местных сопротивлений значительно меньше, чем у расходомеров с сужающими устройствами, поэтому требуемая длина прямых участков для них меньше (обычно считается достаточной длина прямых участков до преобразователя, равная $10D$).

Электромагнитные расходомеры могут быть использованы в ряде случаев, когда применение расходомеров других типов затруднено или невозможно вовсе: при измерении расхода агрессивных, абразивных и вязких жидкостей и пульп, измерении расхода жидких металлов.

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

Ультразвуковые расходомеры

Ультразвуковой метод измерения расхода основан на зависимости скорости ультразвука относительно трубы от скорости потока.

Основные трудности использования ультразвукового метода связаны с тем, что, во-первых, скорость звука в среде зависит от ее физико-химических свойств, температуры, давления и, во-вторых, она значительно больше скорости среды, так что действительная скорость ультразвука в движущейся среде мало отличается от скорости в среде неподвижной. Эти обстоятельства

обуславливают необходимость применения специальных методов компенсации погрешностей, что сильно усложняет измерительные схемы.

Следует отметить также, что ультразвуковые расходомеры применяются главным образом для измерения расхода жидкостей из-за малой интенсивности ультразвуковой волны и большого коэффициента поглощения ультразвука в газах. Основными элементами преобразователей ультразвуковых расходомеров являются излучатели и приемники ультразвуковых колебаний. Ультразвуковые колебания, попадающие на приемник, вызывают его механическую деформацию в виде периодических сжатий и растяжений, которые преобразуются в переменное электрическое напряжение. Ультразвуковые расходомеры можно подразделить на две группы.

К первой группе относятся расходомеры с излучением, перпендикулярным потоку (рис. 2.9): пьезоэлемент 1, возбуждаемый генератором 2, создает ультразвуковые колебания, направленные перпендикулярно оси трубы. По мере увеличения средней скорости потока v_{cp} ультразвуковой луч все более отклоняется по направлению скорости v . Угол отклонения луча θ будет определяться выражением

$$\theta = \arcsin (v_{cp} / c) \approx v_{cp} / c,$$

где c – скорость ультразвука в неподвижной среде.

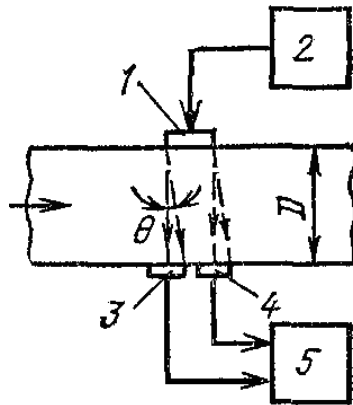


Рис. 2.9. Ультразвуковой расходомер с излучением, перпендикулярным потоку

Линейное отклонение луча у приемных пьезоэлементах 3 и 4 $\delta = D \operatorname{tg} \theta \approx D(v_{cp} / c)$. С увеличением v_{cp} количество энергии, поступающей на пьезоэлемент 3, уменьшается, а поступающей на пьезоэлемент 4, растет и, таким образом, разностный сигнал, поступающий на вход усилителя 5, увеличивается. Расходомеры с такой схемой просты по устройству, но обладают ограниченной точностью из-за малого отклонения луча. Поэтому

наибольшее распространение получили расходомеры второй группы, основанные на измерении скорости прохождения ультразвуковых импульсов между излучателем и приемником в направлении потока контролируемой среды и против него (расходомеры с излучением по потоку).

Измерение расхода по перепаду давления в сужающем устройстве

Метод измерения расхода по перепаду давления в сужающем устройстве основан на зависимости перепада давления в неподвижном сужающем устройстве, устанавливаемом в трубопроводе, от расхода измеряемой среды. Это устройство следует рассматривать как первичный преобразователь расхода. Создаваемый в сужающем устройстве перепад давления измеряется дифманометром, шкала которого градуируется в единицах расхода. При необходимости дистанционной передачи показаний дифманометр должен быть снабжен преобразователем, который линией связи соединяется со вторичным прибором, градуированным в единицах расхода.

Рассматриваемый принцип измерения заключается в том, что при протекании потока через отверстие сужающего устройства повышается скорость потока по сравнению со скоростью до сужения. Увеличение скорости, а, следовательно, и кинетической энергии вызывает уменьшение потенциальной энергии и соответственно статического давления. Расход может быть определен по перепаду давления Δp , измеренному дифманометром в соответствии с градуировочной характеристикой $\Delta p = f(Q)$. Использование рассматриваемого метода измерения требует выполнения определенных условий: характер движения потока до и после сужающего устройства должен быть турбулентным и стационарным; поток должен полностью заполнять все сечение трубопровода; фазовое состояние потока не должно изменяться при его течении через сужающее устройство; во внутренней полости трубопровода до и после сужающего устройства не образуются осадки и другие виды загрязнений; на поверхностях сужающего устройства не образуются отложения, изменяющие его геометрию; пар является перегретым, при этом для него справедливы все положения, касающиеся измерения расхода газа.

В качестве сужающих устройств, для измерения расхода жидкостей, газов и пара используются диафрагмы сопла и значительно реже сопла Вентури. Диафрагма (рис. 2.10, а) представляет собой тонкий диск с круглым отверстием, ось которого располагается по оси трубы. Передняя (входная) часть отверстия имеет цилиндрическую форму, а затем переходит в коническое расширение. Передняя кромка отверстия должна быть

прямоугольной (острой) без закруглений и заусениц. Стандартные диафрагмы устанавливаются на трубопроводах диаметром не менее 50 мм.

Сопло (рис. 2.10, б) имеет спрофилированную входную часть, которая затем переходит в цилиндрический участок диаметром d (его значение входит в уравнения расхода). Торцевая часть сопла имеет цилиндрическую выточку диаметром, большим d , для предохранения выходной кромки цилиндрической части сопла от повреждения.

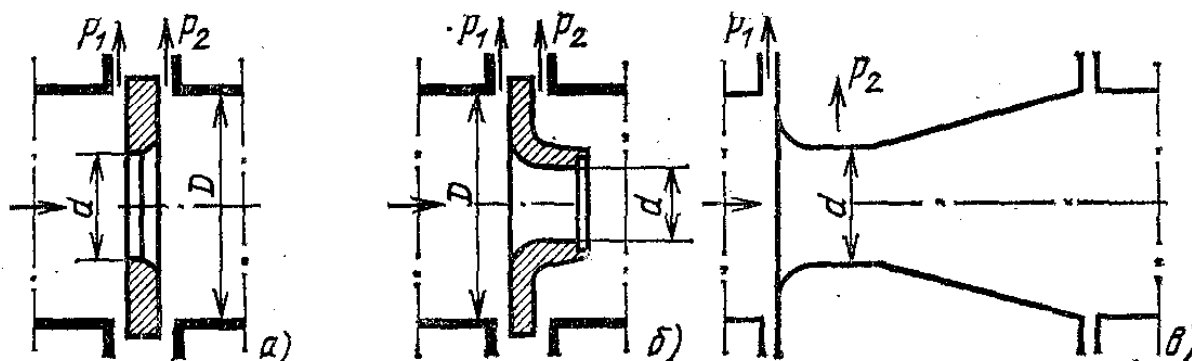


Рис. 2.10. Стандартные сужающие устройства:
а – диафрагма; б – сопло; в – сопло Вентури

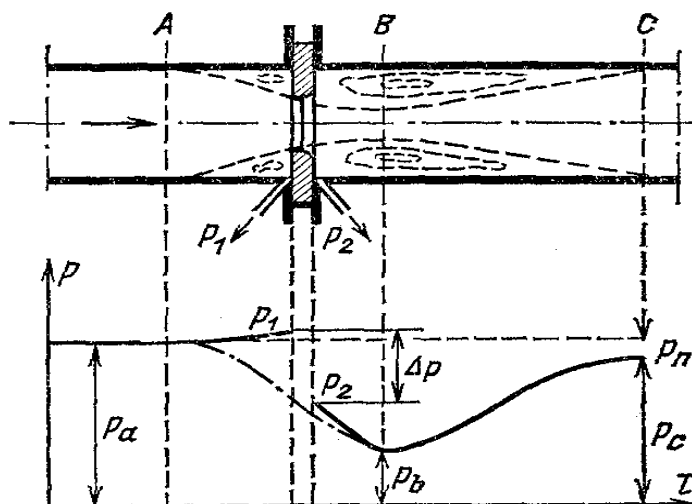


Рис. 2.11. Характер потока и распределение статического давления при установке в трубопроводе диафрагмы

При измерении расхода газа стандартные сопла устанавливаются на трубопроводах диаметром не менее 50 мм и при измерении расхода жидкостей на трубопроводах диаметром не менее 30 мм.

Отношение площади отверстия сужающего устройства F_0 к площади трубопровода F называется относительной площадью (модулем) сужающего устройства $m = F_0/F = (d/D)^2$, где d и D – диаметры отверстия сужающего устройства и трубы.

При измерении расхода газа или пара плотность ρ среды изменяется при прохождении через сужающее устройство вследствие изменения давления. Это учитывается введением в уравнения расхода. Формулы для массового Q_M и объемного Q_0 расхода имеют вид

$$Q_M = \alpha \varepsilon F_0 \sqrt{2\rho(p_1 - p_2)};$$

$$Q_0 = \alpha \varepsilon F_0 \sqrt{\frac{2}{\rho}(p_1 - p_2)},$$

где α – коэффициент расхода;

ε – поправочный множитель на расширение измеряемой среды (для несжимаемых сред $\varepsilon = 1$);

$F_0 = \pi d^2/4$ – площади отверстия сужающего устройства;

ρ – плотность среды в сечении А (т.е. в невозмущенном потоке до сужающего устройства)

$\Delta p = p_1 - p_2$ – перепад давления до и после сужающего устройства.

Для однозначности измерений коэффициент расхода α должен быть постоянной величиной. Однако существующие конструкции сужающих устройств обеспечивают практическое постоянство значений коэффициента расхода α только в определенном ограниченном интервале изменения расхода (точнее, в определенном интервале изменения чисел Рейнольдса Re). На рис. 2.12 представлены графики зависимостей $\alpha = f(Re)$ для диафрагм. Коэффициент расхода α слабо зависит от Re при $Re > Re_{мин}$; поэтому сужающие устройства для измерения расхода могут использоваться только при этих значениях чисел Re (следует отметить, что в реальных условиях α несколько уменьшается с ростом Re).

Между расходом и перепадом давления в сужающем устройстве существует определенная квадратичная зависимость, что позволяет дифманометры, измеряющие перепад давления $\Delta p = p_1 - p_2$, градуировать в единицах расхода. Такие дифманометры называются *дифманометрами-расходомерами*. Для получения равномерной шкалы расходомера в кинематической или электронной схем дифманометров или вторичных приборов включаются различные типы устройств, извлекающих квадратный корень. Наличие таких устройств является одним из недостатков метода измерения расхода по перепаду давления.

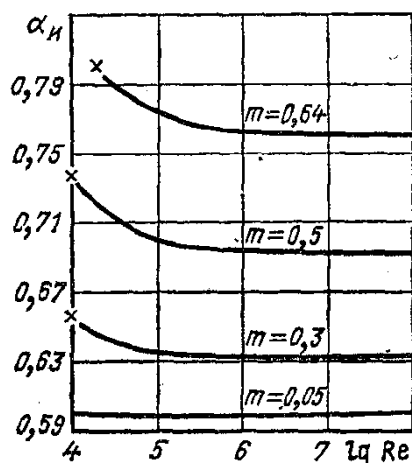


Рис. 2.12. Зависимость $\alpha_{и} = f(Re)$ при различных значениях m для диафрагм с угловым способом отбора

Другим серьезным недостатком метода является суженный диапазон измерения каждого конкретного расходомера, охватывающий обычно интервал 30–100 % максимального измеряемого расхода $Q_{вп}$. Это означает, что использовать конкретный расходомер для измерения расходов в интервале 0–30 % его шкалы не рекомендуется, так как здесь не гарантируется достаточная точность измерения. Это вызвано тем, что в начале шкалы резко увеличивается относительная погрешность измерения перепада давления Δp . Точность расходомера обычно гарантируется только в пределах шкалы 30–100 %.

2.2. ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОГО СТЕНДА

Схема лабораторной установки, представляющей собой гидравлическую систему замкнутого типа, представлена на рис. 2.13.

Основными технологическими частями лабораторной установки являются объект управления 1, представляющий собой вертикальную стальную цилиндрическую емкость с рабочей жидкостью – водой, дренажный бак 2 и стальные трубопроводы на прямой и обратной линии. На трубопроводе $D_y = 25$ мм прямой линии установлены расходомер-счетчик электромагнитный «ВЗЛЕТ ЭР 420Л» 5 и регулирующий клапан с исполнительным механизмом типа «МЭОФ» 14. В качестве регулирующего органа используется поворотный шаровой кран 13. Сопряжение регулирующего органа и исполнительного механизма выполнено механическим кулачково-тяговым способом. Подача воды в рабочую емкость осуществляется по трубопроводу $D_y = 15$ мм с помощью гидронасоса центробежного типа с электрическим частотным приводом 11. Управление

скоростью вращения вала электродвигателя (рабочего колеса центробежного гидронасоса) производится посредством частотного регулируемого преобразователя «MICROMASTER 420» 12. Также имеется линия перелива воды 20 для предотвращения аварийной ситуации (давление нагнетания гидронасоса может разрушить рабочую емкость). Уровень воды в рабочей емкости измеряется гидростатическим методом с помощью датчика 7 перепада давления «КЭР-АИП-НР-01», уровень в дренажном баке – посредством датчика 10 перепада давления «КЭР-АИ-СД-01». В обвязку системы измерения уровня в рабочей емкости входят первичные 4, вторичные 6, перепускной 21 вентили и уравнильный сосуд 17. Уравнильный сосуд служит для исключения влияния общей высоты столба воды в рабочей емкости на отклонение уровня от нормального (на указательном стекле 16 обозначена как нулевая отметка). Установка технологических режимов лабораторного стенда осуществляется с помощью вентиля с ручным управлением 8, 9, 22, 23. Температура воды измеряется датчиком температуры Pt100. Управление технологическим процессом выполняется посредством локальной системы управления, состоящей из контроллера 18 типа SIMATIC C7-635K и рабочей станции на основе персонального компьютера 19. Обмен информацией компьютера и контроллера осуществляется через USB/MPI-адаптер связи.

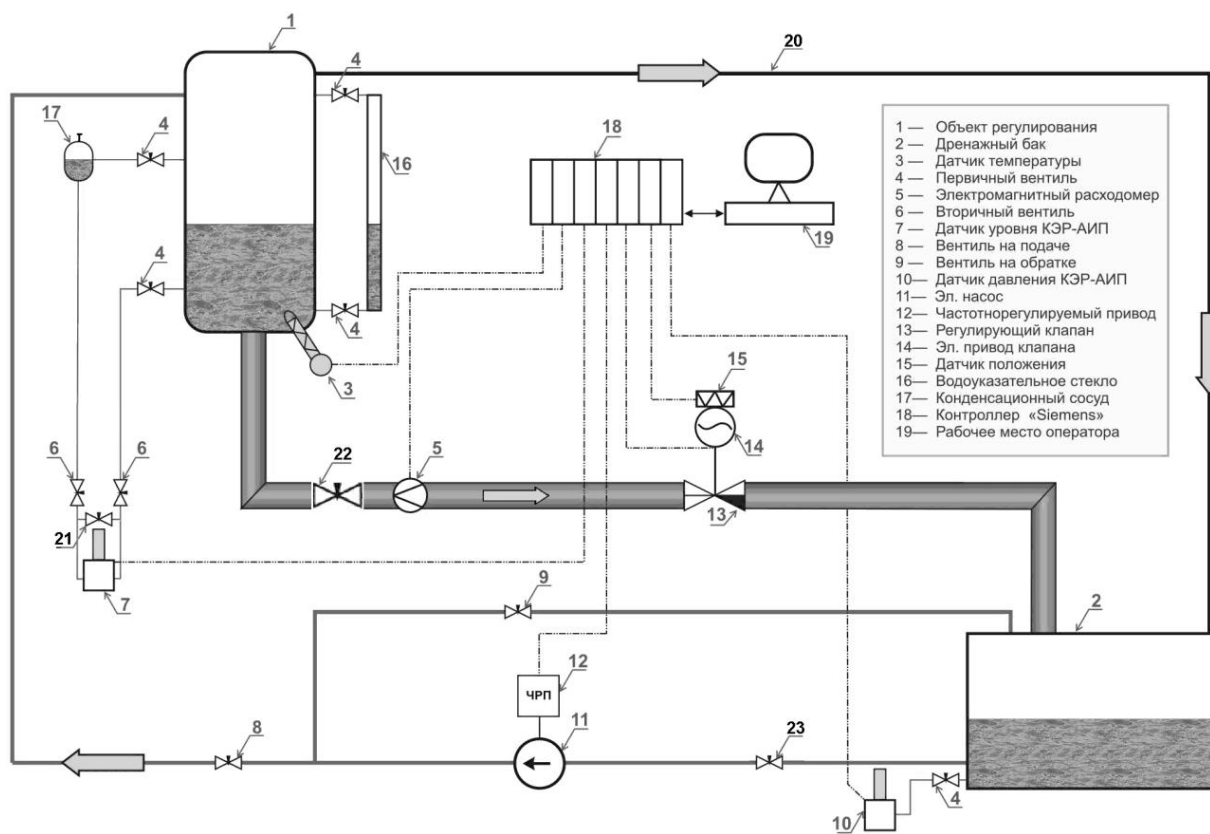


Рис. 2.13. Схема лабораторной установки

2.3. РАСХОДОМЕР-СЧЕТЧИК ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЙ «ВЗЛЕТ ЭР 420Л»

Расходомер-счетчик электромагнитный «ВЗЛЕТ ЭР» предназначен для измерения среднего объемного расхода и объема горячей и холодной воды, а также других электропроводящих жидкостей в широких диапазонах температур и проводимостей в составе автоматизированных систем управления технологическими процессами.

Технические характеристики ВЗЛЕТ ЭР 420Л приведены в табл. 8.

Таблица 8

Наименование параметра	Значение параметра												
	10	15	20	25	32	40	50	65	80	100	150	200	300
1 Диаметр условного прохода (типоразмер), D_v , мм													
2. Наибольший измеряемый средний объемный расход, $Q_{\text{наиб}}$, м ³ /ч	3,40	7,64	13,56	21,23	34,76	54,34	64,90	143,5	217,3	339,6	764,1	1358	3056

3. Чувствительность расходомера по скорости потока, 0,02 м/с.
4. Наибольшее давление в трубопроводе, 2,5 МПа.
5. Наименьшая удельная проводимость рабочей жидкости, См/м $5 \cdot 10^{-4}$.
6. Температура рабочей жидкости, от минус 10 до +150 °С.
7. Напряжение питания постоянного тока, 24 В.
8. Потребляемая мощность, не более 2,5 Вт.
9. Средняя наработка на отказ, 75 000 часов.
10. Средний срок службы, 12 лет.

Пределы допускаемой относительной погрешности расходомера при измерении, индикации, регистрации, хранении и передаче результатов измерения среднего объемного расхода при любом направлении потока в диапазоне расходов от $0,0067 \cdot Q_{\text{наиб}}$ до $Q_{\text{наиб}}$ (коэффициент перекрытия диапазона 1:150) определяются по формуле

$$\delta = \pm \left(0,9 + \frac{0,15}{v} \right), \%$$

где δ – пределы допускаемой относительной погрешности;

v – скорость потока в трубопроводе, м/с.

Связь между скоростью потока v и расходом в трубопроводе Q определяется зависимостью

$$v = \frac{Q}{2,83 \cdot 10^{-3} \cdot D_y^2},$$

где Q – средний объемный расход, м³/ч;

D_y – диаметр условного прохода, мм.

Пределы допускаемой относительной погрешности регистрации времени наработки – $\pm 0,1$ %.

Питание расходомера должно осуществляться стабилизированным напряжением постоянного тока номинальным значением из диапазона (18 – 25) В с уровнем пульсаций не более $\pm 1,0$ %. Питание от сети (154 – 264) В частотой (50 \pm 2) Гц обеспечивается с помощью поставляемого по заказу источника вторичного питания (ИВП) «ВЗЛЕТ ИВП» (рис. 2.19). Источник вторичного питания ИВП-06 24 на объекте крепится на DIN-рейку 35/7,5.

Принцип работы. Расходомер состоит из электромагнитного первичного преобразователя расхода (ППР) и вторичного преобразователя – микропроцессорного измерительного блока (ИБ).

Принцип работы электромагнитного расходомера (ЭМР) основан на измерении электродвижущей силы (ЭДС) индукции, возникающей в объеме электропроводящей жидкости, движущейся в магнитном поле, создаваемом электромагнитной системой во внутренней полости проточной части первичного преобразователя расхода (рис. 2.14).

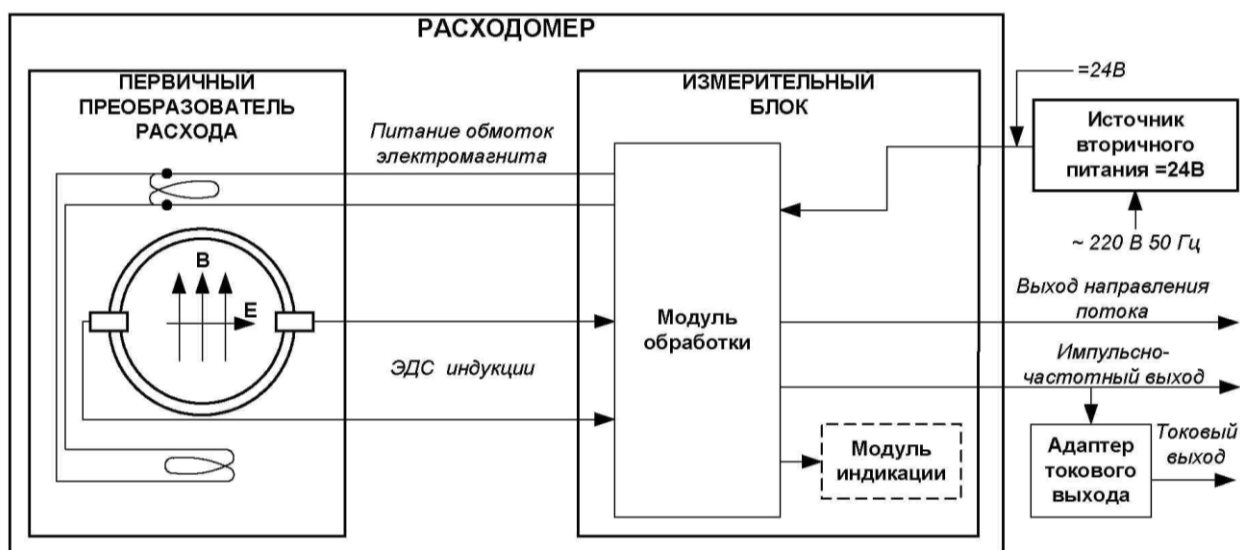
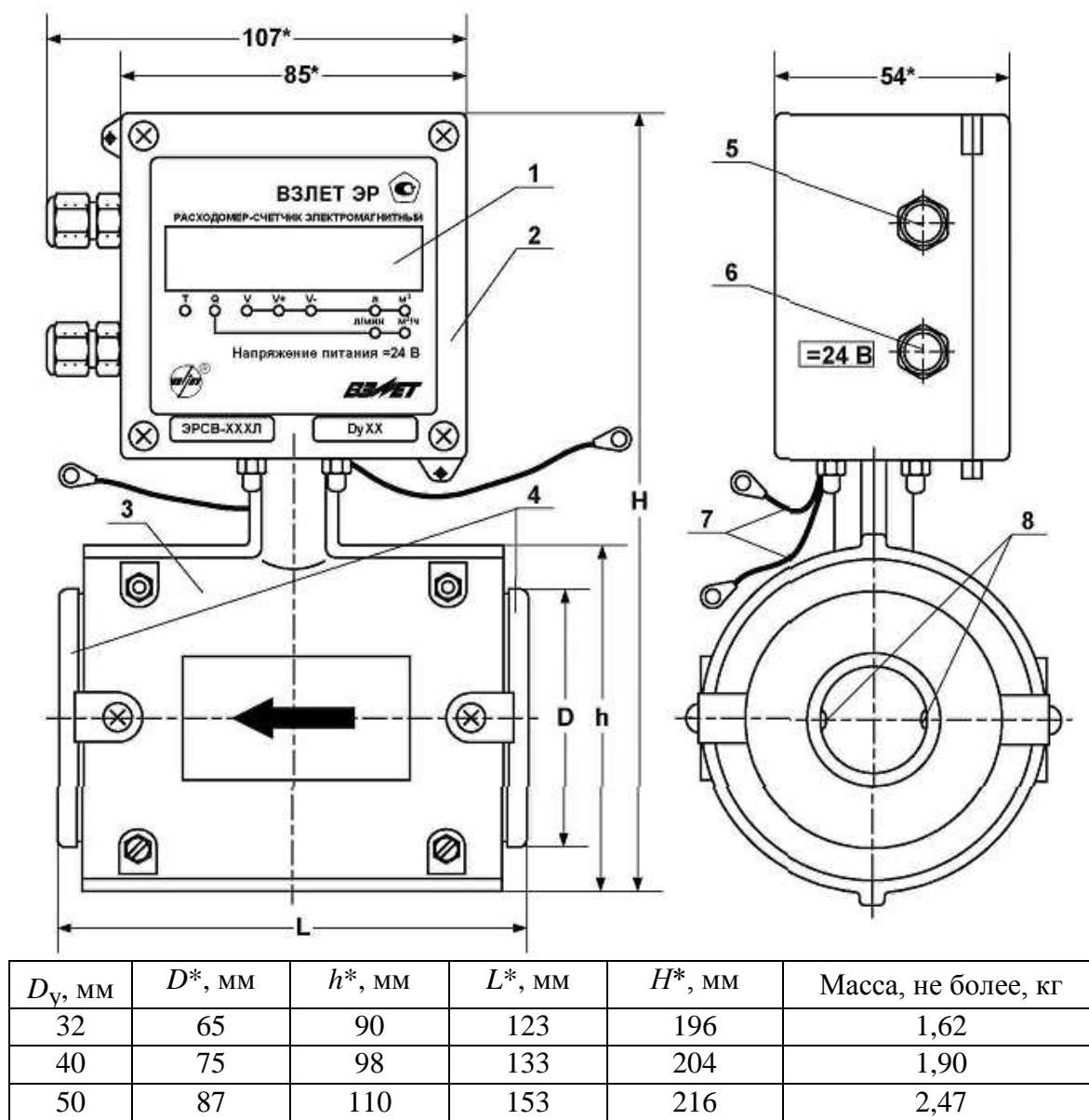


Рис. 2.14. Структурная схема расходомера

Первичный преобразователь расхода (рис. 2.15) представляет собой полый магнитопроницаемый цилиндр, внутри которого протекает контролируемая жидкость. Снаружи цилиндра располагаются обмотки электромагнита. Изнутри цилиндр покрыт электроизоляционным материалом или выполнен целиком из него. Для съема измерительного сигнала в стенках цилиндра диаметрально расположены два электрода, контактирующие с контролируемой жидкостью.



* – справочный размер

Рис. 2.15. Вид составных частей расходомера:

1 – индикатор (при наличии); 2 – измерительный блок; 3 – первичный преобразователь расхода; 4 – защитные кольца; 5 – гермоввод кабеля связи; 6 – гермоввод кабеля питания; 7 – электрические перемычки для соединения корпуса ЭМР с трубопроводом; 8 – электроды

ЭДС индукции E пропорциональна средней скорости потока жидкости v , расстоянию между электродами d (внутреннему диаметру первичного преобразователя) и магнитной индукции B :

$$E = k \cdot B \cdot d \cdot v,$$

где k – коэффициент пропорциональности.

Для данного типоразмера ЭМР B и d – величины постоянные. Значение ЭДС не зависит от температуры, вязкости и проводимости жидкости при условии, что проводимость превышает значение, указанное в технических характеристиках.

С учетом формулы для ЭДС индукции расход Q определяется следующим образом:

$$Q = \frac{\pi d^2}{4} \cdot v = \frac{\pi d}{4 \cdot k \cdot B} E.$$

Измерительный блок обеспечивает:

- питание обмоток электромагнита;
- прием и обработку измерительного сигнала (ЭДС индукции), определение значения среднего объемного расхода;
- преобразование измеренного среднего объемного расхода в последовательность выходных импульсных сигналов;
- определение направления потока и выдачу сигнала направления потока в виде уровня логического сигнала;
- управление индикатором (при наличии);
- накопление объема и времени наработки нарастающим итогом;
- диагностику работы прибора;
- хранение установочных данных, а также параметров накопления; время хранения данных при отсутствии питания – не менее года;
- защиту параметров накопления и установочных данных от несанкционированного доступа.

Токовый выход расходомера выполняется по заказу в виде адаптера, преобразующего импульсную последовательность в выходной ток, пропорциональный расходу.

Режимы работы. Расходомер имеет три режима работы:

- «Настройка» – режим настройки и поверки;
- «Сервис» – режим подготовки к эксплуатации;
- «Работа» – эксплуатационный режим (режим пользователя).

Режимы работы задаются переключателями в виде комбинации наличия или отсутствия замыкания двух контактных пар, расположенных на плате модуля обработки (рис. 2.20). Режимы отличаются возможностями модификации установочных параметров прибора. Модификация

осуществляется программно с помощью преобразователя RS-232, поставляемого по заказу. В режиме «Настройка» доступны все установочные параметры прибора. В этом режиме производится настройка прибора в процессе его изготовления и юстировка (калибровка) при поверке.

В режиме «Работа» возможна модификация только параметров индикации: набора индицируемых параметров, времени индикации одного параметра, единиц измерения, отсечки по индикации.

Вывод информации. Индикация. Перечень параметров, которые могут выводиться на индикатор расходомера, приведен в табл. 9. Значение расхода при обратном направлении потока, а также отрицательные значения суммарного объема и объема обратного потока индицируются со знаком минус. Расходомер оснащен 7-сегментным 8-разрядным с десятичной точкой жидкокристаллическим индикатором (ЖКИ), имеющим две строки (рис. 2.16):

- строку буквенно-цифровой информации;
- строку индикации специального символа – маркера.

Маркеры в виде символа **V** указывают на обозначение индицируемого параметра, а также на обозначения единиц измерения расхода и объема (при их индикации). Обозначения параметров и единиц измерения нанесены на переднюю панель прибора под ЖКИ.

Таблица 9

Обозначение	Наименование параметра	Ед. изм.	Кол-во знаков индикации	
			целая часть	дроб. Часть
Q	Средний объемный расход	$\text{м}^3/\text{ч}$ л/мин	до 7 до 7	до 6 до 5
V	Суммарный объем (нарастающим итогом)	м^3 л	до 4 до 7	3 -
V+	Объем прямого потока (нарастающим итогом)	м^3 л	до 4 до 7	3 -
V-	Объем обратного потока (нарастающим итогом)	м^3 л	до 4 до 7	3 -
T	Время наработки (нарастающим итогом)	час:мин час	до 5 (час) до 6	2 (мин) 2

Период индикации – время индикации одного параметра может устанавливаться в пределах от 1 до 100 с. По умолчанию период индикации устанавливается равным 5 с.

Наличие нештатной ситуации в режиме работы трубопровода или неисправности прибора будет индицироваться в виде символа *H*, периодически появляющегося на соответствующем знакоместе ЖКИ.

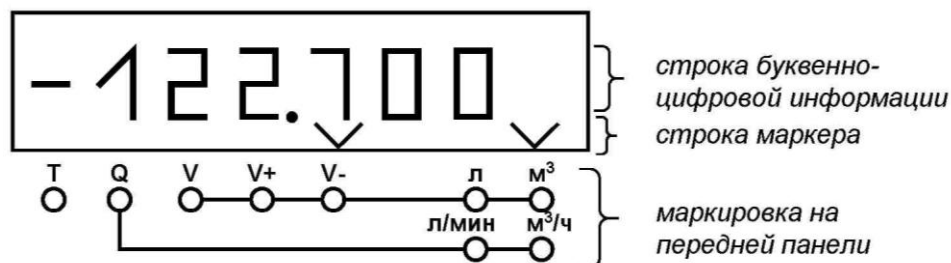


Рис. 2.16. Вид индикатора расходомера и маркировки обозначений на передней панели при индикации объема обратного потока (значение $V = -122,7 \text{ м}^3$)

Универсальные выходы.

Расходомер имеет два универсальных гальванически развязанных выхода. Выходы универсальны как по возможному режиму работы (частотный, импульсный или логический), так и по назначению. В импульсном и частотном режимах на универсальный выход поступает импульсная последовательность типа «меандр» со скважностью 2 и нормированным весом импульса. Предельная частота следования импульсов 2000 Гц.

Токовый выход. Токовый выход расходомера обеспечивается с помощью адаптера токового выхода, подключенного к одному из универсальных выходов, работающему в частотном режиме.

Токовый выход расходомера обеспечивается с помощью адаптера токового выхода (рис. 2.17), преобразующего импульсную последовательность в выходной ток, значение которого соответствует измеренному значению расхода.

Диапазон работы токового выхода 0–5 мА, 0–20 мА или 4–20 мА на сопротивление нагрузки от 0,05 до 1 кОм.

Программирование минимального и максимального значений заданного диапазона токового выхода выполняется при выпуске из производства по заказу. Минимальное значение токового диапазона соответствует частоте 0 Гц на импульсном выходе, максимальное – 1600 Гц.

Напряжение питания адаптера – 36 В, 50 Гц, мощность потребления – не более 2 ВА. Адаптер может питаться от сети 36 В, 50 Гц или от автономного преобразователя напряжения ~220/36 В 50 Гц.

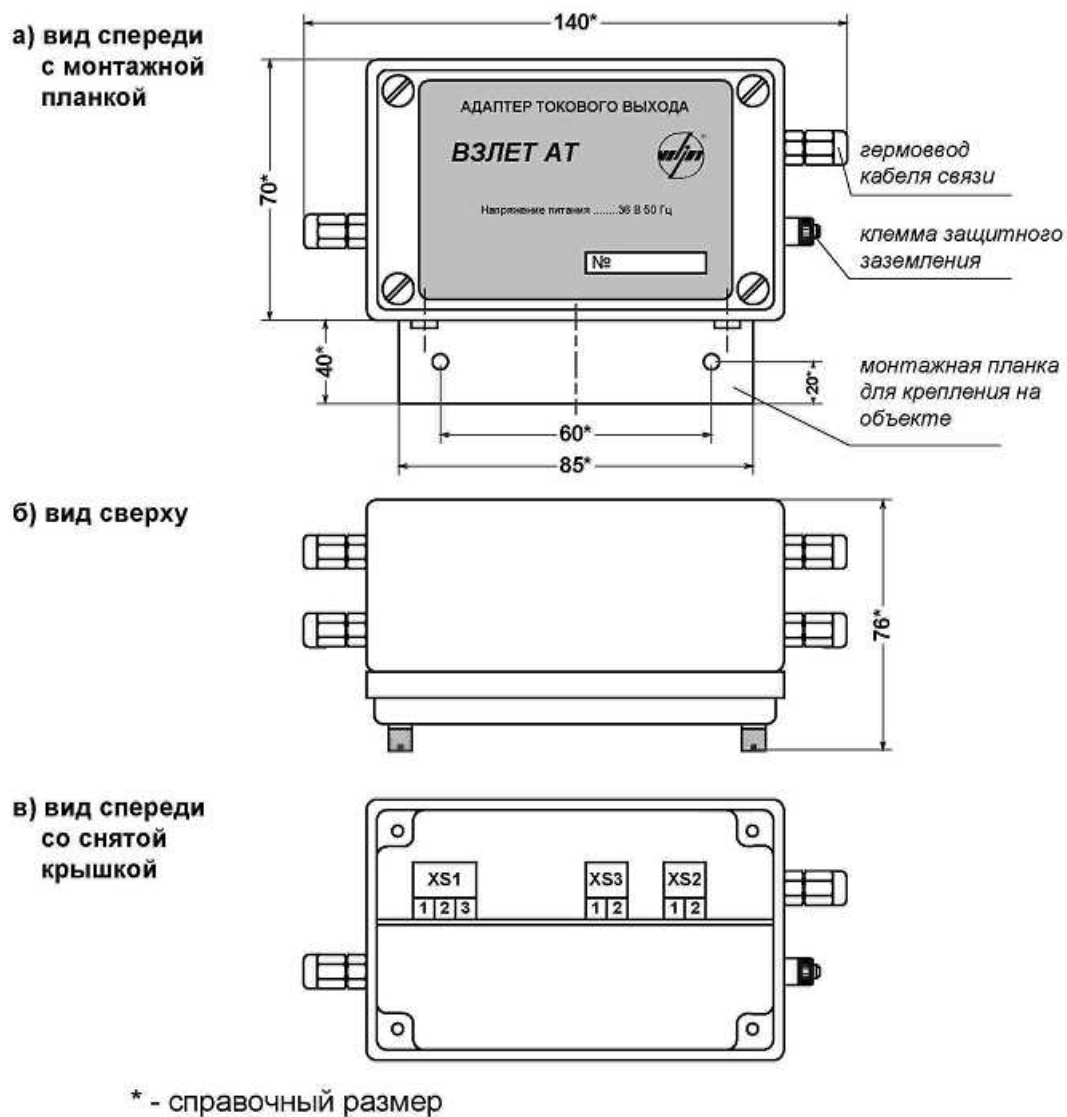


Рис. 2.17. Адаптер токового выхода

Вид адаптера приведен на рис. 2.17, схема подключения адаптера приведена на рис. 2.18.

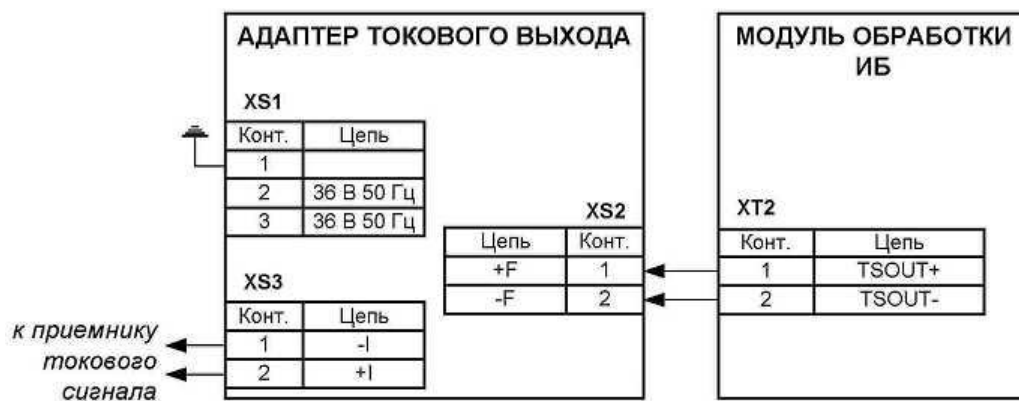


Рис. 2.18. Схема подключения адаптера

При подключении адаптера токового выхода к универсальному выходу расходомера необходимо с помощью соответствующих перемычек установить активный режим питания его выходного каскада.

Вид источника вторичного питания «ВЗЛЕТ ИВП» приведен на рис. 2.19.



* - справочный размер

Рис. 2.19. Источник вторичного питания «ВЗЛЕТ ИВП» ИВП-06.24

Сервисные функции. В расходомере имеется возможность установки отсечек снизу по измерению расхода: **по нарастанию** и **по убыванию**, а также **отсечки по индикатору**. Отсечки **по нарастанию** и **по убыванию** – это пороговые значения расхода, ниже которых (при изменении расхода в большую и меньшую сторону соответственно) отсутствует накопление объема, выдача импульсов и токового сигнала. При этом индицируется нулевое значение расхода. **Отсечка по индикатору** – это значение расхода, ниже которого индицируется нулевое значение расхода, а накопление объема, выдача импульсов и токового сигнала продолжают. Значение каждой из отсечек может устанавливаться в пределах от 0 до $0,255 \cdot Q_{\text{наиб}}$ с дискретностью $0,001 \cdot Q_{\text{наиб}}$.

Конструкция. Проточная часть расходомера выполнена в виде присоединения типа «сэндвич», когда первичный преобразователь расхода (ППР) с помощью шпилек зажимается между двумя фланцами, приваренными к концам трубопровода в месте врезки расходомера. Внутренняя поверхность ППР футеруется фторопластом, либо ППР полностью выполняется из высокопрочного термостойкого полимера. На торцевые поверхности ППР под присоединение типа «сэндвич» с покрытием фторопластом для предохранения выступающей футеровки в процессе монтажа и эксплуатации устанавливаются защитные кольца.

Измерительный блок (ИБ) (рис. 2.20) содержит одну или две печатные платы. Плата модуля обработки размещается в корпусе измерительного блока, а плата модуля индикации с индикатором (при наличии) – в прозрачной крышке корпуса (передней панели). Между собой они соединяются сигнальным шлейфом и кабелем питания подсвета индикатора (при необходимости).

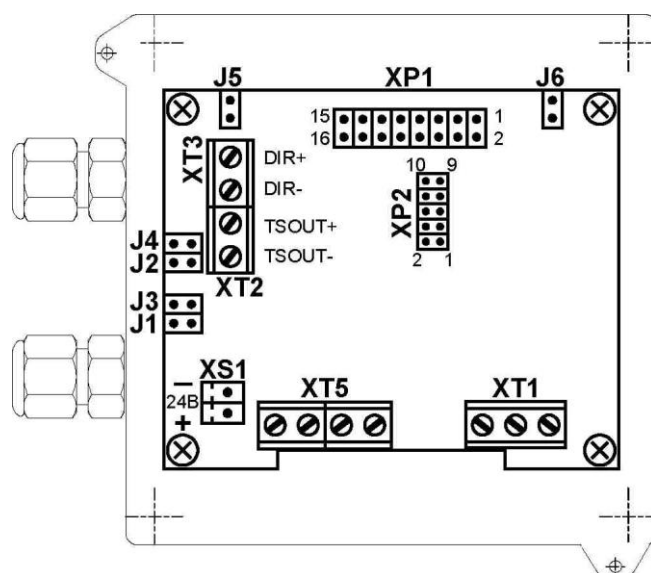


Рис. 2.20. Вид измерительного блока без крышки (вид модуля обработки): *XP1* – разъем подключения шлейфа модуля индикации или преобразователя RS-232; *XS1* – разъем подключения кабеля питания =24 В; *XT2* – контактная колодка универсального выхода № 1; *XT3* – контактная колодка универсального выхода № 2; *J1*, *J3* – контактные пары задания режима работы универсального выхода № 1; *J2*, *J4* – контактные пары задания режима работы универсального выхода № 2; *J5* – контактная пара разрешения модификации калибровочных параметров; *J6* – контактная пара разрешения модификации сервисных параметров; *XP2*, *XT1*, *XT5* – технологические контактные элементы

Ввод кабеля питания и сигнальных кабелей осуществляется через два кабельных гермоввода типоразмера Pg7. При необходимости (для удобства считывания показаний с индикатора) передняя панель может устанавливаться на блок с поворотом на $\pm 90^\circ$ или 180° . Корпус ИБ из полимера крепится на полый стойке ППР.

Эксплуатация. Расходомер может устанавливаться в вертикальном, горизонтальном или наклонном трубопроводах. Наличие грязевиков или специальных фильтров не обязательно. Точная и надежная работа расходомера обеспечивается при выполнении в трубопроводе установки ППР следующих условий:

- отсутствует скопление воздуха;
- давление жидкости исключает газообразование в трубопроводе;
- на входе и выходе ППР имеются прямолинейные участки трубопровода соответствующей длины с D_v , равным D_v ППР. На этих участках не должно быть никаких устройств или элементов, вызывающих изменение структуры потока жидкости;
- весь внутренний объем канала ППР в процессе работы расходомера заполнен жидкостью;
- напряженность внешнего магнитного поля промышленной частоты не превышает 40 А/м.

Тип и состав контролируемой жидкости (наличие и концентрация взвесей, посторонних жидкостей и т.п.), а также состояние трубопровода не должны приводить к появлению отложений, влияющих на работоспособность и метрологические характеристики расходомера.

Выбор типоразмера расходомера определяется диапазоном расходов в трубопроводе, где будет устанавливаться ППР. Если диапазон расходов для данного трубопровода находится в диапазоне расходов нескольких типоразмеров ЭМР, то определять нужный типоразмер рекомендуется исходя из заданного предельного значения потерь напора.

Меры безопасности. При проведении работ с расходомером опасными факторами для человека являются переменное напряжение (с действующим значением до 264 В частотой 50 Гц);

Проверка. Расходомер-счетчик электромагнитный «ВЗЛЕТ ЭР» имеет межповерочный интервал 4 года.

Тема «Человеко-машинный интерфейс лабораторного стенда» приведена в пункте 1.5.

2.4. МЕТОДИКА ВЫПОЛНЕНИЯ ПОВЕРКИ ГРАДУИРОВКИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО РАСХОДОМЕРА

1. Убедиться, что уравнильный сосуд 13 заполнен водой, краны 4, 8, 23 (рис. 2.21) открыты, кран 9 (рис. 2.21) закрыт.

2. Включить лабораторный стенд (рис. 2.21), для чего проверить подключение стенда к сети 220 В; нажать кнопку включения ИБП 6 и перевести автоматические выключатели 1 в положение «включено» (верхнее положение), проверить рабочее состояние контроллера 2, в случае необходимости включить. Дождаться полной загрузки рабочей станции и программы управления на базе контроллера.

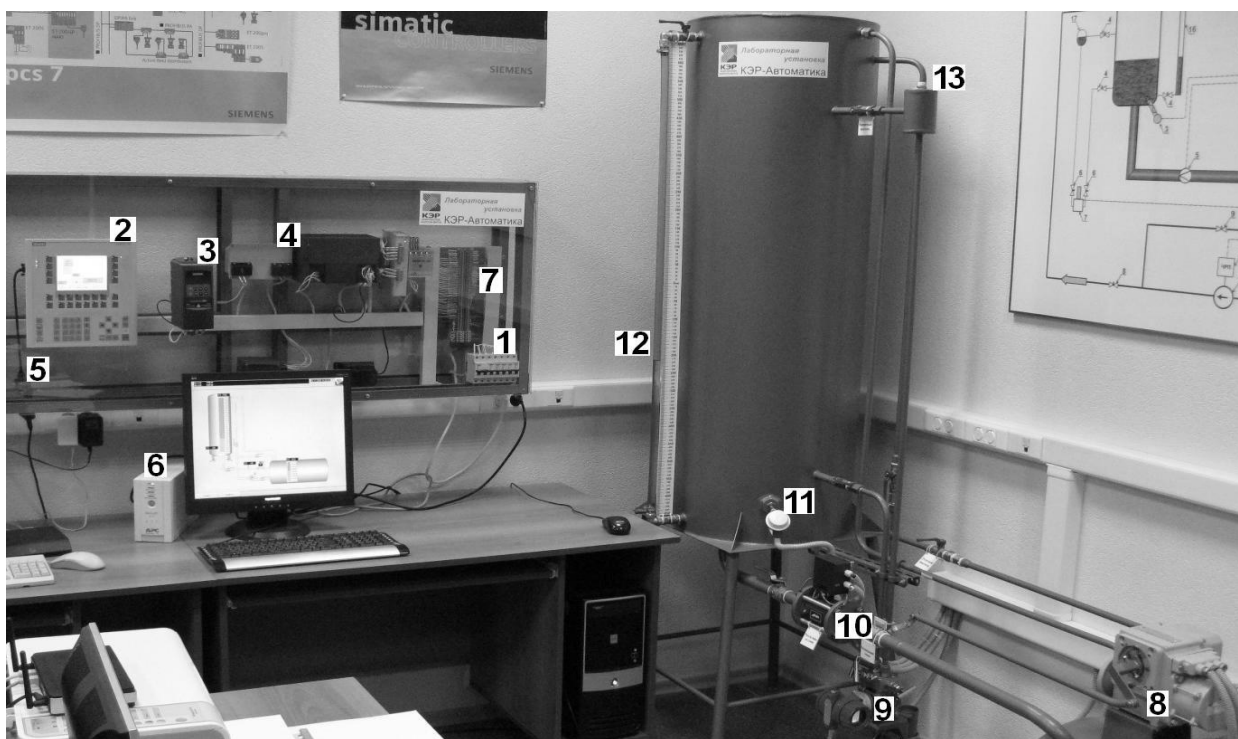


Рис. 2.21. Лабораторный стенд

3. Получить у преподавателя поверяемые отметки уровня. Записать заданные отметки в таблицу наблюдений 10.

4. Установить регулирующий кран 13 (рис. 2.13) в полностью закрытое состояние, для чего вызвать его окно (рис. 2.26, 2.27), включить аварийный дистанционный режим управления, установить задатчиком положение 0 %.

5. Задать первую (низшую) отметку расхода подачи воды в рабочую емкость, для чего вызвать окно управления гидронасосом (рис. 2.28, 2.29), включить аварийный дистанционный режим управления, установить задатчиком частоту, контролируя расход по окну расходомера (рис. 2.24). В

рабочей емкости уровень воды должен начинать повышаться. При отсутствии повышения уровня обратиться к персоналу кафедры или преподавателю.

Таблица 10

Показания расходомера, $Q_{пр}$		Повышение уровня по водомерному стеклу, мм $\Delta h = h_k - h_n$		Время заполнения объема жидкости, с Δt	Расчетное значение расхода по водомерному стеклу $Q_{рвс}$		Абсолютная погрешность расходомера, ΔQ	
л/мин	м ³ /час	Начальная отметка h_n	Конечная отметка h_k		л/мин	м ³ /час	л/мин	м ³ /час

6. Выждать 10÷20 секунд и установить следующую отметку расхода подачи воды в рабочую емкость по частоте вращения рабочего колеса гидронасоса, контролируя расход по окну расходомера.

7. Повторить действия, представленные в п. 6 для следующих заданных отметок, наблюдая параметр по расширенному окну отображения уровня в рабочей емкости

8. По окончании опытов установить регулирующий кран 13 (рис. 2.13) в полностью открытое состояние, для чего вызвать его окно, установить задатчиком положение 100 %. Проверить отключенное состояние гидронасоса по окну отображения, в случае рабочего состояния отключить гидронасос.

9. Для просмотра временного графика уровня вызвать оперативный архив щелчком правой клавиши мыши на расширенном поле вывода аналогового параметра (рис. 2.22) или нажатием клавиши графика на основной мнемосхеме. Пользуясь строкой управления трендов, выделить активный участок.

10. По окончании опытов выключить рабочую станцию, дождаться конца всех программ и перевести автоматические выключатели 1 в положение «выключено».

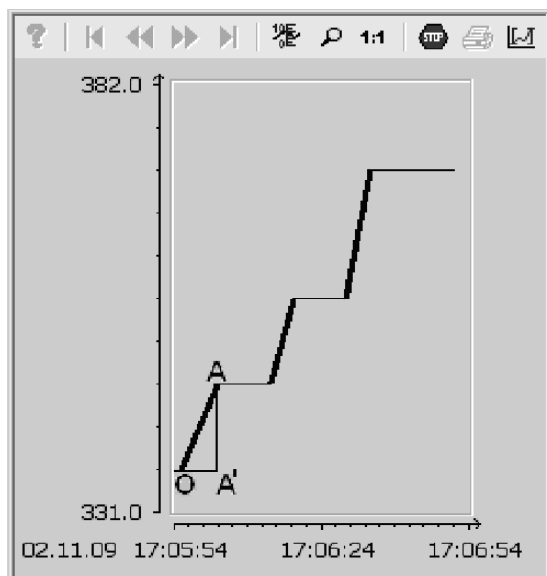


Рис. 2.22. Активный участок графика уровня в рабочей емкости

2.5. ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ОПЫТОВ

1. Для каждой поверяемой отметки определить расход по формуле

$$Q = \frac{S \cdot \Delta h}{\Delta t \cdot 3600} = \frac{0,195 \cdot \Delta h}{\Delta t \cdot 3600}, \text{ м}^3/\text{час};$$

где $S = 0,195 \text{ м}^2$ – площадь поперечного сечения рабочей емкости;

Δh – повышение уровня воды в рабочей емкости при данном фиксированном расходе, м;

Δt – время заполнения уровня Δh для данного расхода, с.

Повышение уровня Δh определяется по тренду (рис. 2.31) как отрезок AA'.

Время Δt заполнения уровня Δh для данного расхода определяется как отрезок OA.

2. Расход в л/мин определяется по формуле

$$Q [\text{л/мин}] = 16,67 \cdot Q [\text{м}^3/\text{час}].$$

3. Абсолютная погрешность измерения расхода вычисляется

$$\Delta Q = Q_{\text{пр}} - Q_{\text{рвс}}, \text{ мм},$$

Результаты записать в табл. 10.

4. Записать вывод о максимальной абсолютной по модулю погрешности.

2.6. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

Отчет должен содержать следующее: дату заполнения, номер и наименование работы, результаты поверки расходомера в виде таблицы, выводы по работе.

2.7. ЗАДАНИЕ НА САМОСТОЯТЕЛЬНУЮ РАБОТУ

Изучить методы и средства измерения расхода.

2.8. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Дайте пояснения к методам и средствам измерения расхода.
2. Объясните общую схему и принцип действия гидравлической системы замкнутого типа
3. Объясните схему и принцип действия расходомера-счетчика «ВЗЛЕТ ЭР 420Л».
4. Дайте характеристику расходомеру-счетчику «ВЗЛЕТ ЭР 420Л».
5. Как определяется абсолютная погрешность расходомера?

ТРЕБОВАНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ

В клавиатуре пульта управления и в мышь-манипуляторе не имеется частей, находящихся под напряжением, опасным для жизни.

Блоки питания контроллера, датчиков температуры, давления и расходомера-счетчика подключены к сети 220 В. Запрещается прикасаться к токоведущим частям блоков питания и кроссового клеммника без отключения лабораторного стенда.

Видеомониторы, установленные на пульте управления системой, имеют нетокопроводящий корпус и изолированы от частей, находящихся под повышенным напряжением.

Следует помнить, что мониторы питаются от сети 220 В, кроме того, некоторые мониторы содержат электронные узлы, вырабатывающие высокое напряжение (около 25 киловольт), опасное для жизни. Категорически запрещается вскрытие корпуса видеомонитора без его отключения. Следует не допускать попадания влаги на монитор, а при ее попадании запрещается прикасаться к увлажненным и токопроводящим поверхностям пульта управления. В этом случае, а также при механическом повреждении необходимо вызвать персонал кафедры.

ЛИТЕРАТУРА

1. Иванова Г.М. / Теплотехнические измерения и приборы. – Г.М. Иванова, Н.Д. Кузнецов, В.С. Чистяков. – М.: Энергоатомиздат, 2006. – 232 с.
2. Сергеев А.Г. Метрология, стандартизация, сертификация: Учеб. пособие / А.Г. Сергеев, М.В. Латышев, В.В. Терегеря. – М.: Логос, 2005. – 560 с.
3. Плетнев Г.П. Автоматизация технологических процессов и производств в теплоэнергетике: учебник для вузов / Г.П. Плетнев. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Издательство МЭИ, 2005. – 352 с.
4. Рачков М.Ю. Технические средства автоматизации: Учебник / М.Ю. Рачков – 2-е изд., стереотип. – М.: МГИУ, 2007. – 185 с.

СОДЕРЖАНИЕ

Лабораторная работа № 1. Изучение систем измерения давления и уровня жидкости на основе интеллектуального датчика давления «КЭР-АИП-НР-01»	3
1.1. Общие сведения об измерении уровня гидростатическим методом. . .	3
1.2. Измерение давления в автоматизированных системах.	14
1.3. Описание лабораторного стенда.	31
1.4. Датчики давления «КЭР-АИП», «КЭР-АИ»	32
1.5. Человеко-машинный интерфейс лабораторного стенда.	43
1.6. Методика выполнения поверки гидростатического уровнемера. . .	52
1.7. Обработка результатов опытов.	53
1.8. Содержание отчета.	54
1.9. Задание на самостоятельную работу.	54
1.10. Контрольные вопросы.	54
Лабораторная работа № 2. Изучение системы измерения расхода жидкости на основе электромагнитного расходомера-счетчика «ВЗЛЕТ ЭР»	55
2.1. Общие сведения об измерении расхода расходомеры вихревые, постоянного перепада давления, тахометрические, электромагнитные, ультразвуковые и переменного перепада давления.	55
2.2. Описание лабораторного стенда.	72
2.3. Расходомер-счетчик электромагнитный «ВЗЛЕТ ЭР 420Л».	74
2.4. Методика выполнения градуировки электромагнитного расходомера.	84
2.5. Обработка результатов опытов.	86
2.6. Содержание отчета.	87
2.7. Задание на самостоятельную работу.	87
2.8. Контрольные вопросы.	87
Требования безопасности.	88
Литература.	89

Учебное издание

ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА АВТОМАТИЗАЦИИ

Составители: **Гильфанов Камиль Хабибович,
Богданов Александр Нетфулович,
Валиева Венера Ильдусовна,
Шипкова Татьяна Николаевна**

Методические указания по выполнению лабораторных работ

Кафедра автоматизации технологических
процессов и производств КГЭУ

Редактор редакционно-издательского отдела *А.В. Заяц*
Компьютерная верстка *А.В. Заяц*

Подписано в печать 22.03.13.

Формат 60×84/16. Бумага ВХИ. Гарнитура «Times». Вид печати РОМ.

Усл. печ. л. 5,33. Уч.-изд. л. 5,93. Тираж 500 экз. Заказ № 4607.

Редакционно-издательский отдел КГЭУ,
420066, Казань, Красносельская, 51