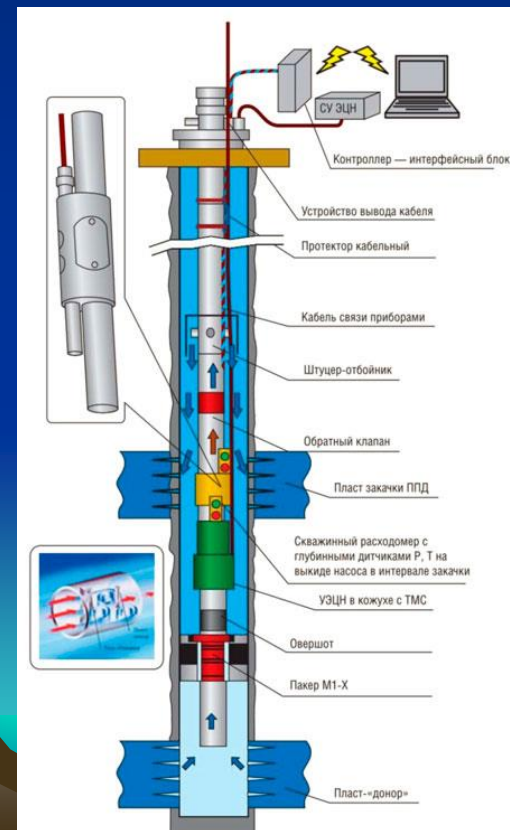


Лекция 4. «МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЯ ОСНОВНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ»



«МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЯ ОСНОВНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ»

4.1 Методы электрических измерений

4.2. Методы и средства измерения температуры

4.3. Методы и средства измерения уровня.

4.4. Методы и средства измерения давления.

4.5. Методы и средства измерения расхода



4.1 Методы электрических измерений

Мостовая и компенсационная измерительные схемы.

Существующие методы электрических измерений можно в основном разделить на два класса: непосредственной оценки и сравнения.

При ***непосредственной оценке*** измерительная схема выполняет лишь функции преобразования выходного сигнала датчика, например, усиливает его или согласует выходное сопротивление датчика с входным сопротивлением прибора. Этот метод прост, но применяется редко, так как ему свойственны значительные погрешности (особенно при изменении напряжения питания датчика).

Метод ***сравнения*** обеспечивает более высокие точность и чувствительность. При этом используются:

- мостовые,
- дифференциальные и
- компенсационные схемы измерения.

4.1 Методы электрических измерений

Мостовые измерительные схемы применяют постоянного и переменного тока. Существуют мостовые схемы уравновешенные и неуравновешенные схемы. Уравновешенные мосты требуют ручной или автоматической балансировки, в то время как неуравновешенные мосты балансировки не требуют.

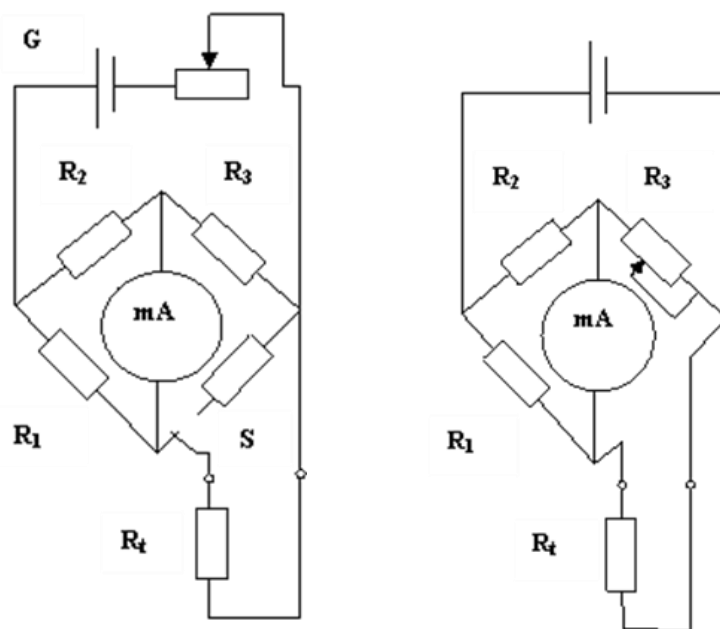


Рис. 4.1. Мостовые измерительные схемы: а) уравновешенная; б) неуравновешенная.

4.1 Методы электрических измерений

Закон уравновешенного моста: произведение сопротивлений противолежащих плеч должны быть равны.

$$R_1/R_2=R_3/R_t \text{ или } R_1 \cdot R_t=R_2 \cdot R_3 \quad (4.1)$$

Если необходимо вычислить неизвестное сопротивление датчика, то можно включить его в одно из плеч моста, вместо резистора R_4 и воспользоваться формулой:

$$R_t=R_2 \cdot R_3/R_1 \quad (4.2)$$

Ток в диагонали моста, содержащей измерительный прибор, через напряжение питания:

$$I_{np}=U(R_1R_t-R_2R_3)/M \quad (4.3)$$

Основной характеристикой любой схемы является ее чувствительность. Она определяется как отношение приращения тока в измерительной диагонали ΔI_{np} к вызвавшему его изменению сопротивления одного из плеч моста:

$$S_{cx}=\Delta I_{np}/\Delta R \quad (4.4)$$

$$\Delta I_{np}=U\Delta R R_t/M \quad (4.5.)$$

где ΔI_{np} - результирующий ток в диагонали моста, содержащей измерительный прибор, А; U - напряжение питания, В; M - входное напряжение, В.

4.1 Методы электрических измерений

Компенсационные схемы используют для измерения неэлектрических величин, которые преобразуются датчиками в ЭДС или напряжение. Сигнал датчика сравнивается с компенсирующим напряжением, вырабатываемым потенциометром. Подбор компенсирующего напряжения выполняется вручную или автоматически.

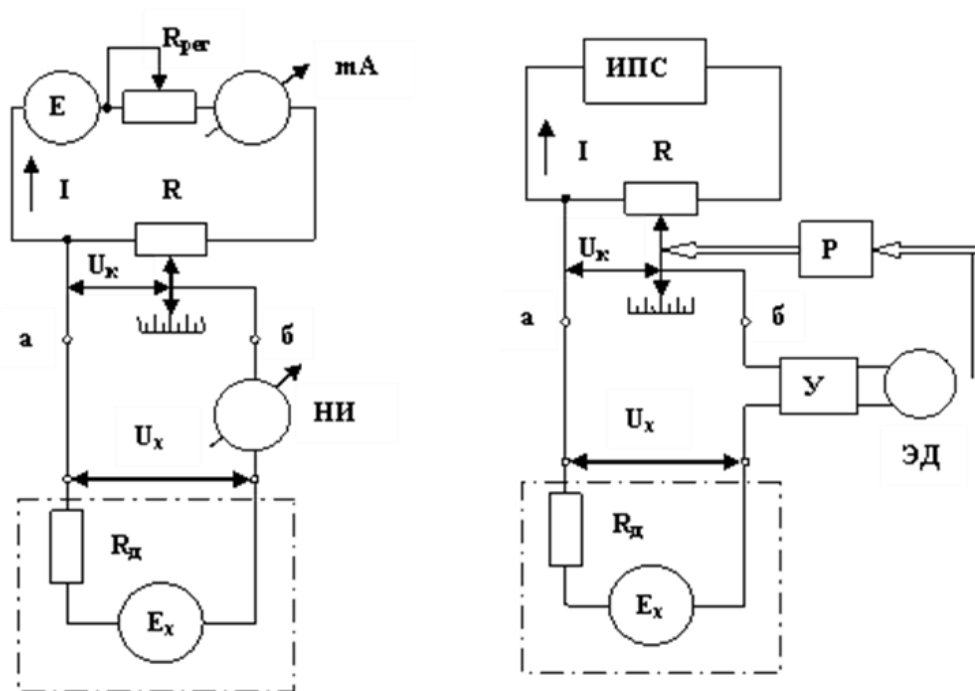


Рисунок 1 - Компенсационные измерительные схемы: а) с ручным уравниванием, б) с автоматическим уравниванием

4.1 Методы электрических измерений

Ток через прибор:

$$I_{\text{пр}} = (U_x - U_k) / (R_d + R_k + R_{\text{пр}}), \quad (4.6)$$

где R_d - сопротивление датчика, R_k – сопротивление резистора, $R_{\text{пр}}$ - сопротивление прибора, U_k – компенсирующее напряжение, U_x – измеряемое напряжение.

Чувствительность компенсационной схемы можно определить как отношение приращение тока через прибор к вызывающему его изменению измеряемого напряжения:

$$S_{\text{сх}} = \Delta I_{\text{пр}} / \Delta U_x \quad (4.7)$$

$$\Delta I_{\text{пр}} = \Delta U_x / (R_{\text{аб}} + R_{\text{пр}} + R_d), \quad (4.8)$$

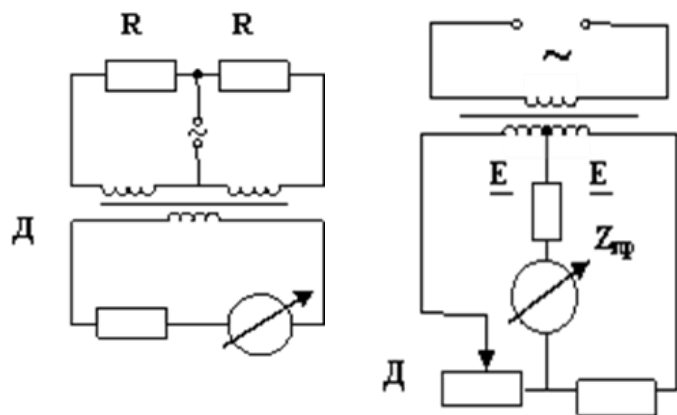
$R_{\text{аб}}$ – внутреннее сопротивление электрической цепи питания,

$$R_{\text{аб}} = ((R_k(R - R_k + R_{\text{рег}})) / (R_k + R_{\text{рег}})) \quad (4.9)$$

Компенсационный метод измерения применяется в цепях как постоянного, так и переменного тока.

4.1 Методы электрических измерений

Дифференциальная схема - это гибрид мостовой и компенсационной схем. Состоит из двух смежных контуров с источником питания, а измерительный прибор включен в общую ветвь контуров и реагирует на разность контурных токов. В дифференциальной схеме могут быть использованы параметрические (с изменяющимся сопротивлением) и генераторные (с изменяющейся ЭДС) датчики.



Изменение тока через прибор будет рассчитываться:

Рисунок 1 - Дифференциальные схемы включения:

а) параметрических датчиков; б) генераторных

$$\Delta I_{\text{пр}} = I'_{\text{пр}} - I''_{\text{пр}} = \frac{E}{R_{\text{пр}}} \cdot \frac{R + \Delta R}{R + \Delta R + R_{\text{пр}} R / (R_{\text{пр}} + R)} - \frac{R}{R + R_{\text{пр}} (R + \Delta R) / (R_{\text{пр}} + R + \Delta R)}$$

где $I'_{\text{пр}}$ - ток через прибор при включении параметрических датчиков в один контур

I'' - ток через прибор при включении параметрических датчиков в оба контура.

4.2. Методы и средства измерения температуры.

Температурой называют величину, характеризующую степень нагретости вещества.

Классификация средств измерений температуры.

Приборы для измерения температуры разделяются в зависимости от физических свойств, положенных в основу их построения, на следующие группы:

- термометры расширения;
- манометрические термометры;
- электрические термометры сопротивления;
- термоэлектрические преобразователи (термопары);
- пирометры излучения

4.2. Методы и средства измерения температуры.

Соотношение температурной шкалы Фаренгейта и Цельсия

	шкала Фаренгейта	шкала Цельсия
Точка кипения	212°	100°
	194°	90°
	176°	80°
	158°	70°
	140°	60°
	122°	50°
	104°	40°
	86°	30°
	68°	20°
	50°	10°
Точка замерзания	32°	0°
	14°	-10°
	0°	-17,8°
Температура абсолютного нуля	-459,67°	-273,15°

4.2. Методы и средства измерения температуры.

Термометры расширения. Предназначены для измерения температур в диапазоне от -190 до +500 градусов Цельсия. Принцип действия термометров расширения основан на свойстве тел под действием температуры изменять объем, а следовательно, и линейные размеры. Термометры расширения разделяются на жидкостные стеклянные и механические (дилатометрические и биметаллические).

В качестве термометрической жидкости в жидкостных стеклянных термометрах применяется ртуть, этиловый спирт, керосин, толуол, пентан.

Механические термометры.

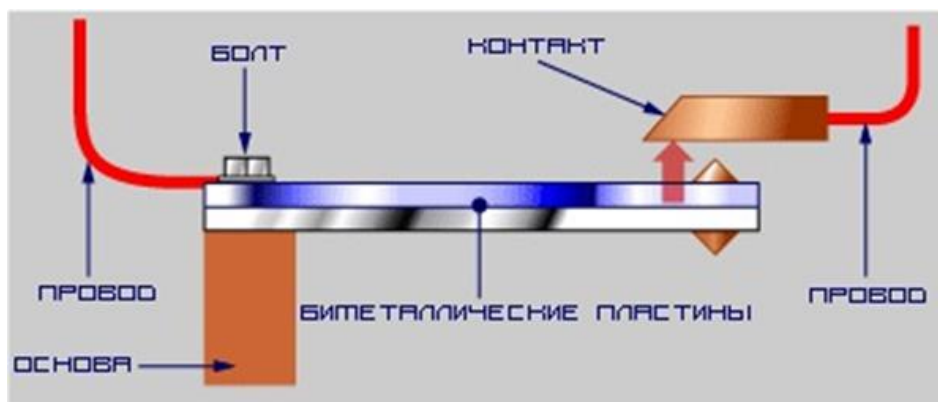
Принцип действия

дилатометрических термометров основан на пре-образовании изменений температуры в разность удлинений двух твердых тел, обусловленную



4.2. Методы и средства измерения температуры.

Принцип действия **биметаллического термометра** основан на использовании в его чувствительном элементе двух металлов с различными температурными коэффициентами линейного расширения. Металлические пластины прочно соединяются между собой, в основном путем сварки, и образуют биметаллическую пружину, которая при нагревании расширяется и замыкает контакт или вращает стрелку термометра.



4.2. Методы и средства измерения температуры.

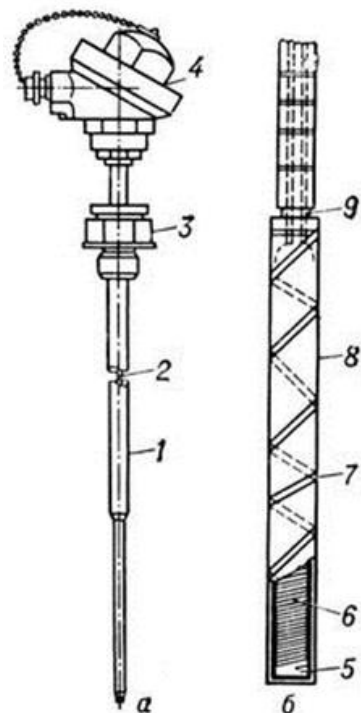
Манометрические термометры

предназначены для измерения температуры в диапазоне от -160 до +600 градусов Цельсия. Принцип действия манометрических термометров основан на изменении давления жидкости, газа или пара, помещенных в замкнутом объеме, при нагревании или охлаждении этих веществ;



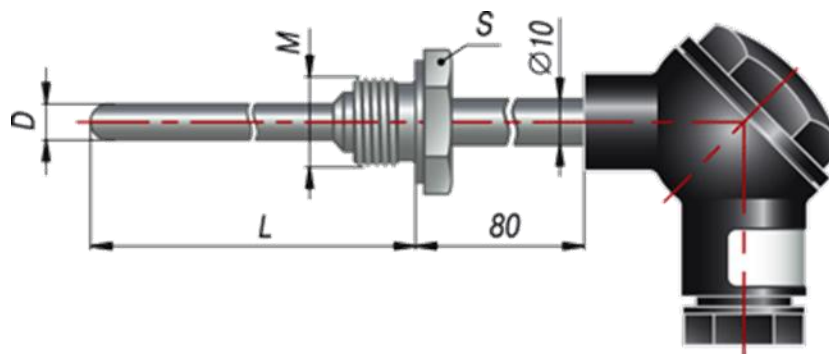
Электрические термометры сопротивления

применяются для измерения температур в диапазоне от -200 до +650 градусов Цельсия. Термометр сопротивления ТС это термометр, как правило, в металлическом или керамическом корпусе, чувствительный элемент которого представляет собой резистор, выполненный из металлической проволоки или пленки и имеющий известную зависимость электрического сопротивления от температуры.



4.2. Методы и средства измерения температуры.

Термоэлектрические преобразователи (термопары) используются при измерения температуры от 0 до +1800 градусов Цельсия. Термопара – старейший и до сих пор наиболее распространенный в промышленности температурный датчик.



Принцип действия термопар основан на свойстве разнородных металлов и сплавов образовывать в спаяе термоэлектродвижущую силу, зависящую от температуры спая.

4.2. Методы и средства измерения температуры.

Пирометры излучения применяются для измерения температуры в диапазоне от +100 до 2500 градусов Цельсия. Пирометры излучения работают по принципу измерения излучаемой нагретыми телами энергии, изменяющейся в зависимости от температуры этих тел. принцип работы которых основан на измерении суммарной энергии или состава излучения нагретого тела. В зависимости от способа измерения различают:

- радиационные,
- оптические,
- фотоэлектрические и
- цветовые пирометры.

Радиационные пирометры. Эти пирометры измеряют полную (световую и тепловую) энергию излучения тела с помощью телескопа и вторичного прибора. Телескоп радиационного пирометра служит бесконтактным датчиком температуры и состоит из оптической системы, в фокусе которой находятся рабочие спайи термобатарей, т. е. нескольких соединенных последовательно термопар.

Термобатарея преобразует излучаемую поверхностью нагретого тела энергию в ТЭДС, которая измеряется вторичным прибором. При наличии во вторичном приборе регулирующего устройства радиационный пирометр позволяет автоматически регулировать температуру в объекте (печь, ванна).



4.2. Методы и средства измерения температуры.

Оптические пирометры. Эти пирометры, называемые также яркостными, используют для периодического контроля температуры в печах и ваннах. С их помощью измеряют температуру по монохроматической яркости (интенсивности излучения) тела в видимой области спектра путем сравнения ее с яркостью нити эталонной пирометрической лампочки. Изменением тока накала нити ее яркость доводится до яркости измеряемого тела, при этом нить исчезает на его фоне, так как тело и нить имеют одинаковую температуру.



4.2. Методы и средства измерения температуры.

Фотоэлектрические пирометры служат для измерения температуры нагретых твердых тел в пределах от 600 до 2000° С. Их особенно успешно используют для измерения температуры быстропротекающих процессов.

Принцип действия фотоэлектрического пирометра основан на свойстве фотоэлементов вырабатывать фотоэлектрический ток, пропорциональный интенсивности светового потока, который подается на фотоэлемент от излучателя. Так как интенсивность светового потока, в свою очередь, пропорциональна измеряемой температуре излучателя, то при помощи фотоэлементов можно измерять температуру нагретых тел.

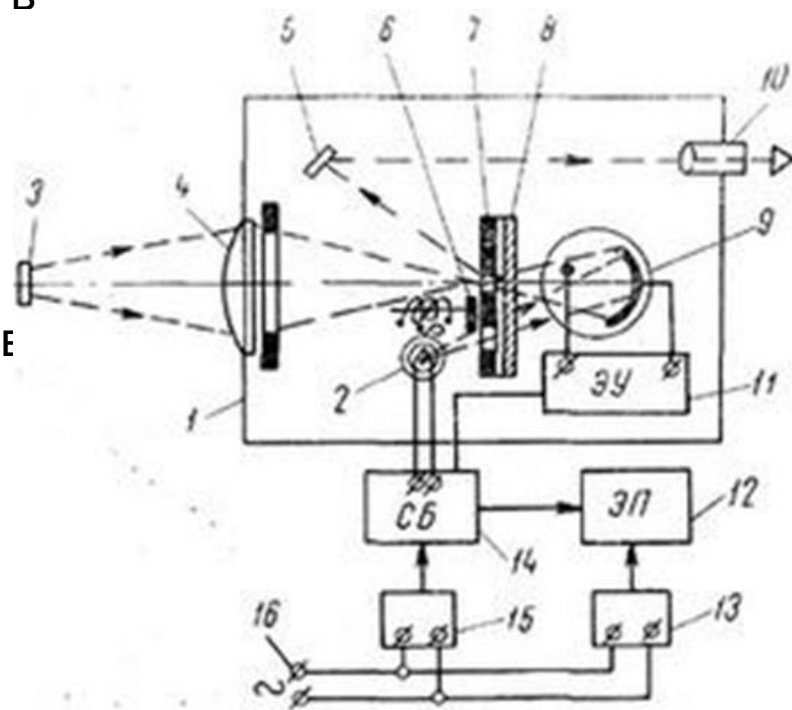


Рис. 4.5. Принципиальная схема пирометра фотоэлектрического ФЭП-3 (Россия).

4.2. Методы и средства измерения температуры.

Цветовые пирометры измеряют температуру по отношению интенсивностей монохроматического излучения тела для двух диапазонов длин волн красного и сине-зеленого участков видимой части спектра. Такое отношение характеризует так называемую цветовую температуру, которая совпадает с истинной для абсолютно черного и серых тел. В отечественных цветовых пирометрах использован метод красно-синего отношения. Для измерения обоих монохроматических яркостей используют один приемник излучения (фотоэлемент или фотосопротивление) с общим каналом усиления измеряемых сигналов.

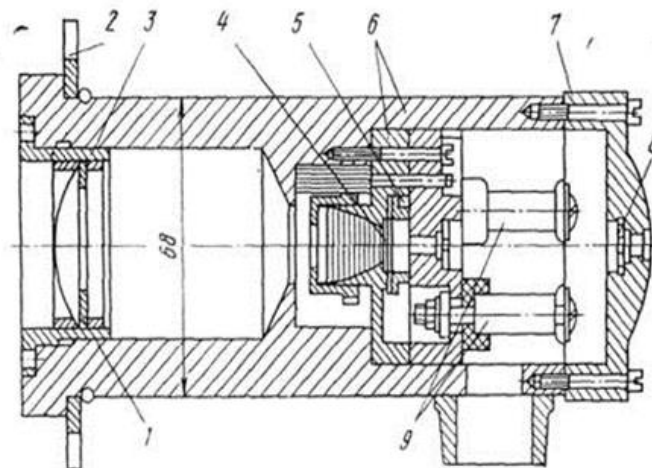


Рис. 4.3. Устройство пирометра с телескопом ТЭРА – 50: 1 – линза; 2 – установочный фланец; 3 – сменная втулка; 4 – термобатарея; 5 – компенсационная катушка; 6 – камера термобатареи; 7 – крышка; 8 – отверстие для наблюдения; 9 – ввод проводов.

4.3. Методы и средства измерения уровня.

Для измерения уровня жидкости применяют поплавковые, буйковые, гидростатические, ультразвуковые и акустические приборы, для измерения уровня жидкости и твердых сыпучих материалов — емкостные и радиоизотопные.

Поплавковым уровнемером называется уровнемер, основанный на измерении положения поплавка, частично погруженного в жидкость, причем степень погружения поплавка (осадка) при неизменной плотности жидкости не зависит от контролируемого уровня. Поплавок перемещается вертикально вместе с уровнем жидкости, и, следовательно, по его положению может быть определено значение уровня. В статическом режиме на поплавок действуют: сила тяжести G и выталкивающие силы жидкости и газовой среды. При перемещении поплавка появляется также сила сопротивления в подвижных элементах уровнемера.

Если пренебречь силой сопротивления кинематики и выталкивающей силой газовой фазы, то действующие на поплавок силы связаны уравнением

$$G = V_{\text{ж}} \rho_{\text{ж}} g, \quad (4.11)$$

где $V_{\text{ж}}$ — объем погруженной части поплавка, $\rho_{\text{ж}}$ — плотность жидкости.

Объем $V_{\text{ж}}$ однозначно определяет осадку (глубину погружения) поплавка. При изменении плотности контролируемой жидкости на $\Delta \rho_{\text{ж}}$ изменяется объем погруженной части на $\Delta V_{\text{ж}}$, что приводит к изменению осадка, т.е. к появлению дополнительной погрешности. Выражение для $\Delta V_{\text{ж}}$ можно получить в виде

$$\Delta V_{\text{ж}} = (\delta V_{\text{ж}} / \delta \rho_{\text{ж}}) \Delta \rho_{\text{ж}} = -V_{\text{ж}} (\Delta \rho_{\text{ж}} / \rho_{\text{ж}}) \quad (4.12)$$

4.3. Методы и средства измерения уровня.

При более высоких значениях температуры и давления среды используются поплавковые уровнемеры с магнитными преобразователями. Примером таких приборов являются магнитные уровнемеры типа ПМП (рис. 4.5) НПП «СЕНСОР».

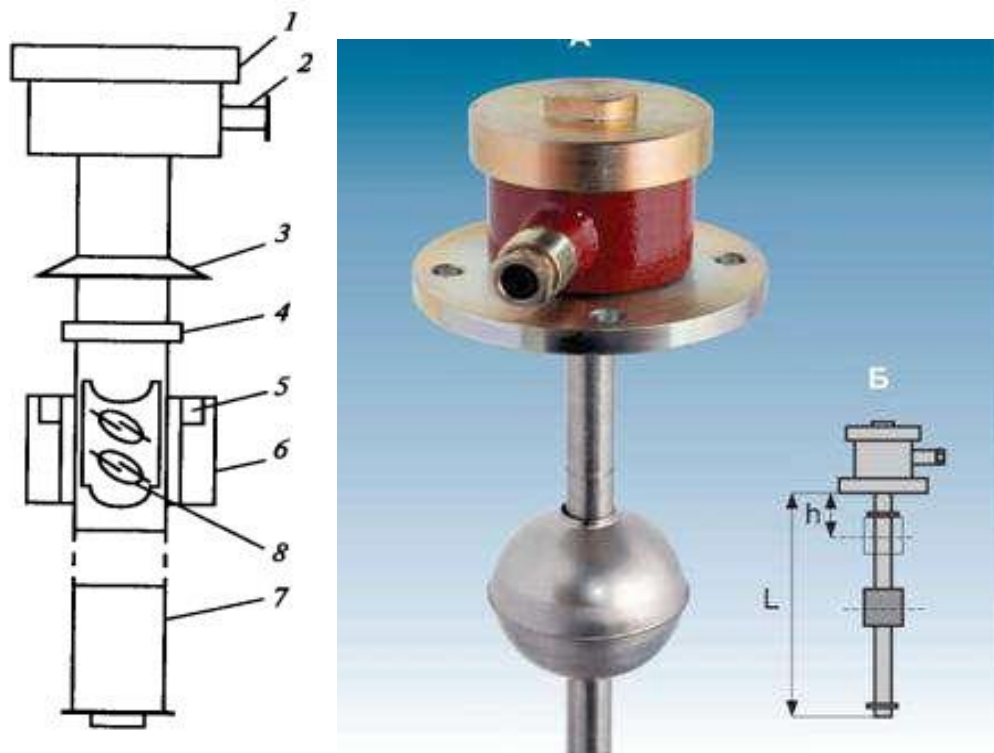


Рис. 4.5. Схема поплавкового уровнемера ПМП: 1 — корпус; 2 — кабельный вывод; 3 — зонтик; 4 — стопорное кольцо; 5 — постоянный магнит; 6 — поплавок; 7 — направляющая трубка; 8 — герконовое реле.

4.3. Методы и средства измерения уровня.

Буйковыми уровнемерами называются уровнемеры, основанные на законе Архимеда: зависимости выталкивающей силы, действующей на буюк, от уровня жидкости. Чувствительным элементом таких уровнемеров является массивное тело (например, цилиндр) — буюк, подвешенное вертикально внутри сосуда и частично погруженное в контролируемую жидкость (рис. 4.6).

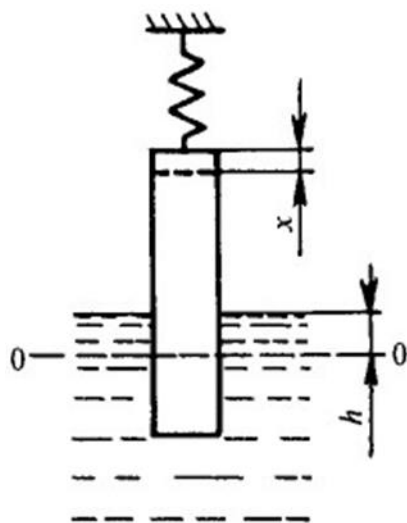


Рис. 4.6. Расчетная схема буйкового уровнемера

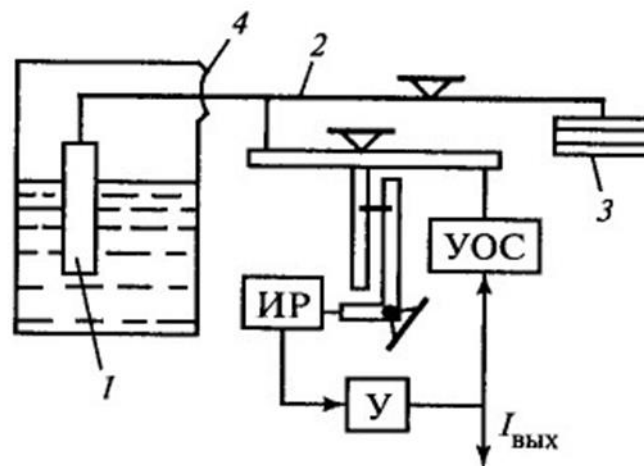


Рис. 4.7. Схема буйкового уровнемера (типа САПФИР) с электросиловым преобразователем: 1 — буюк; 2 — рычаг; 3 — груз; 4 — разделительная мембрана.

4.3. Методы и средства измерения уровня.

Основным принципом действия **гидростатических уровнемеров** является измерение гидростатического давления, оказываемого жидкостью.

Величина гидростатического давления P_r зависит от высоты столба жидкости h над измерительным прибором и от плотности этой жидкости ρ .

Измерение гидростатического давления может осуществляться различными способами, например:

- манометром или датчиком давления, которые подключаются к резервуару на высоте, равной нижнему предельному значению уровня;
- дифференциальным манометром, который подключается к резервуару на высоте, равной нижнему предельному значению уровня, и к газовому пространству над жидкостью;
- измерением давления воздуха, прокачиваемого по трубке, опущенной в жидкость на фиксированное расстояние, и другими.

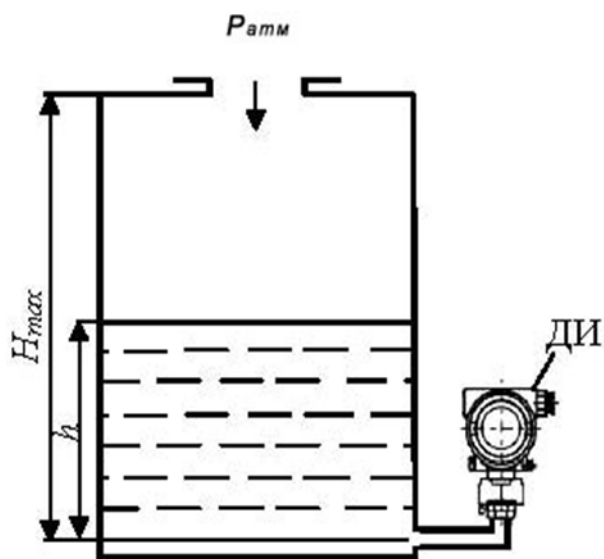


Рис. 4.8. Измерение уровня в резервуаре при помощи датчика избыточного давления

4.3. Методы и средства измерения уровня.

Емкостными уровнемерами называются уровнемеры, основанные на зависимости электрической емкости конденсаторного преобразователя, образованного одним или несколькими стержнями, цилиндрами или пластинами, частично введенными в жидкость, от ее уровня.

Конструкция конденсаторных преобразователей различна для электропроводных и неэлектропроводных жидкостей.

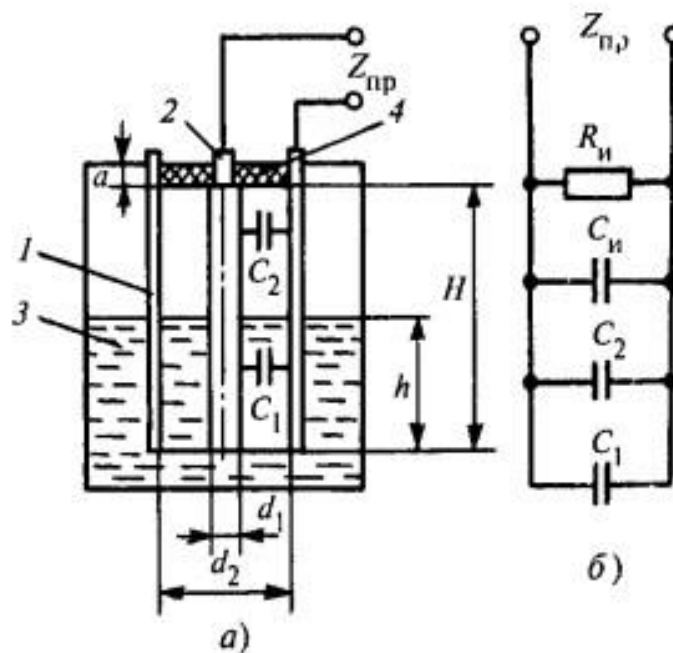


Рис. 4.13. Схема конденсаторного преобразователя уровня для неэлектропроводных сред: 1,2 — электроды; 3 — резервуар; 4 — изолятор

4.3. Методы и средства измерения уровня.

Радиоизотопные уровнемеры

Такие уровнемеры применяют для измерения уровня жидкостей и сыпучих материалов в закрытых емкостях. Их действие основано на поглощении γ -лучей при прохождении через слой вещества.

В радиоизотопном уровнемере источник и приемник излучения подвешены на стальных лентах, на которых они могут перемещаться в трубах по всей высоте бака. Ленты намотаны на барабан, приводимый в движение реверсивным электродвигателем.

Если измерительная система (источник и приемник γ -лучей) расположена выше уровня измеряемой среды, поглощение излучения слабое и от приемника по кабелю на блок управления будет приходить сильный сигнал. По этому сигналу электродвигатель получит команду на спуск измерительной системы. При снижении ее ниже уровня среды поглощение γ -лучей резко увеличится, сигнал на выходе приемника уменьшится, и электродвигатель начнет поднимать измерительную систему.

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



4.3. Методы и средства измерения уровня.

Ультразвуковые и акустические уровнемеры

По принципу действия акустические уровнемеры можно подразделить на локационные, поглощения и резонансные.

В *локационных ультразвуковых уровнемерах* используется эффект отражения ультразвуковых колебаний от границы раздела жидкость — газ, в связи с чем они получили название ультразвуковых. Положение уровня определяется по времени прохождения ультразвуковых колебаний от источника до приемника после отражения их от поверхности раздела.

В *уровнемерах поглощения* положение уровня определяется по ослаблению интенсивности ультразвука при прохождении через слои жидкости и газа.

В *резонансных уровнемерах* измерение уровня производится посредством измерения частоты собственных колебаний столба газа над уровнем жидкости, которая зависит от высоты уровня.

4.3. Методы и средства измерения уровня.

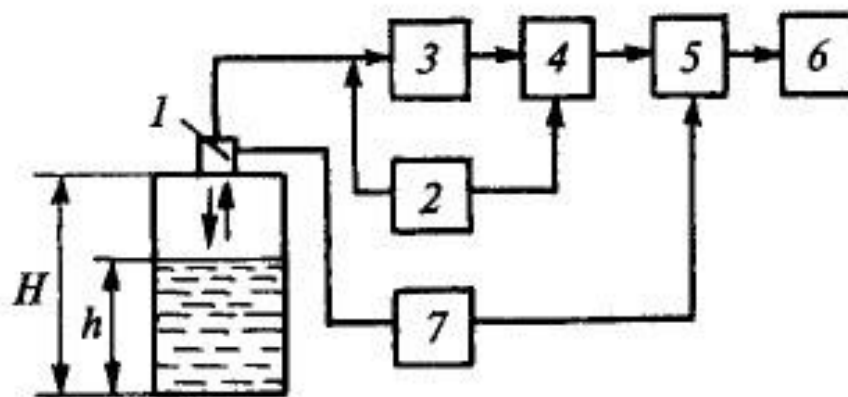


Рис. 4.18. Упрощенная схема акустического ультразвукового уровнемера:

1 — акустический преобразователь; 2 — генератор; 3 — усилитель; 4 — схема измерения времени; 5 — преобразователь; 6 — вторичный прибор; 7 — блок температурной компенсации.

4.3. Методы и средства измерения уровня.

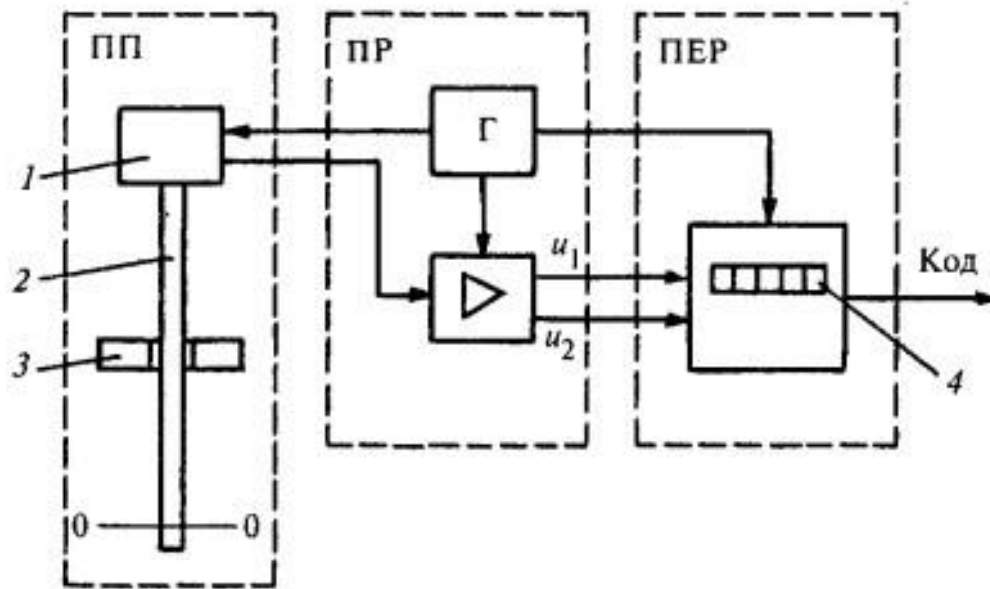


Рис. 4.19. Схема ультразвукового уровнемера:

*1 — источник ультразвуковых колебаний; 2 — металлический стержень;
S — поплавок; 4 — индикатор*

4.4. Методы и средства измерения давления

Давление характеризует напряженное состояние жидкостей и газов в условиях всестороннего сжатия и определяется частным от деления нормальной к поверхности силы на площадь этой поверхности

$$p=N/F , \quad (4.22)$$

где p — давление; N — нормальная сила, действующая на поверхность; F — площадь поверхности.

Абсолютное давление — давление, значение которого при измерении отсчитывается от давления, равного нулю. Абсолютное давление воздушной оболочки Земли на ее поверхность называется **атмосферным давлением**.

С учетом специфики каждого из видов давления при измерениях применяются специальные средства измерений - манометры и измерительные преобразователи давления.

Манометр — измерительный прибор или измерительная установка для измерения давления или разности давлений с непосредственным отсчетом их значения.

Измерительный преобразователь давления (датчик) — первичный преобразователь, выходной сигнал которого функционально связан с измеряемым давлением или разностью давлений. Выходной сигнал датчика вторичными приборами преобразуется в показания значения давления или поступает в различные системы управления и регулирования

4.4. Методы и средства измерения давления

В соответствии с видами измеряемого давления применяют следующие **виды средств измерения давления**:

- манометр абсолютного давления — манометр для измерения абсолютного давления;
- барометр — манометр для измерения атмосферного давления; манометр избыточного давления — манометр для измерения положительного избыточного давления;
- вакуумметр - манометр для измерения отрицательного избыточного давления. Вакуумметрами часто называют манометры, предназначенные для измерения низких абсолютных давлений, существенно меньших, чем атмосферное давление (в вакуумной технике);
- мановакуумметр — манометр, для измерения как положительного, так и отрицательного избыточного давления;
- дифференциальный манометр (дифманометр) — манометр для измерения разности двух давлений, каждое из которых отличается от атмосферного давления;
- микроманометр — дифференциальный манометр для измерения малых разностей двух давлений, каждое из которых существенно больше их разности.

4.4. Методы и средства измерения давления

Единицы измерения давления

Когерентной единицей Международной системы единиц (СИ) является паскаль (Па). По определению единица давления паскаль представляет собой отношение единицы силы Ньютона к единице площади квадратному метру:

$$1 \text{ Па} = 1 \text{ Н/м}^2 = 1 \text{ кг/(м} \cdot \text{с}^2)$$

Наиболее близка к СИ единица давления бар (бар), размер, которой очень удобен для практики ($1 \text{ бар} = 1 \cdot 10^5 \text{ Па}$).

Размеры этих единиц давления пересчитываются в единицы СИ на основании формулы

$$p = H \rho g, \quad (4.23)$$

где H - высота столба жидкости, м, ρ - плотность жидкости, кг/м³, g - ускорение свободного падения, м/с².

4.4. Методы и средства измерения давления

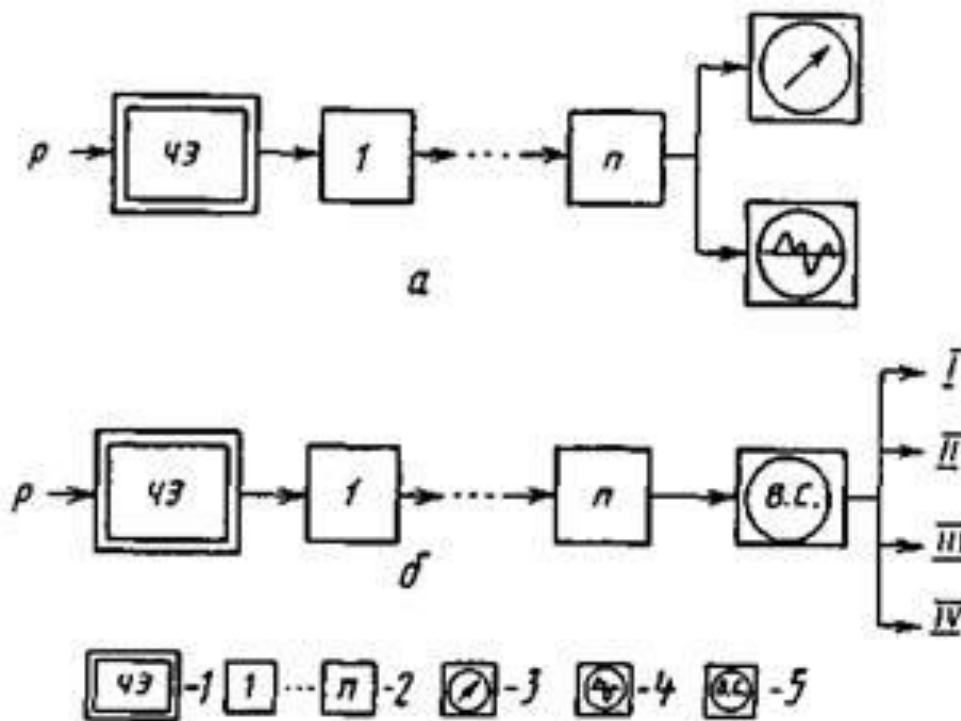


Рис. 4.20. Структурные блок-схемы:

a — манометра; b — измерительного преобразователя давления; p — измеряемое давление; 1 — чувствительный элемент (первичный преобразователь); 2 — промежуточные преобразователи; 3 — показания; 4 — регистрация; 5 — выходной сигнал; $\rightarrow$ к системам: I — измерения и контроль; II — регистрации; III — регулирования; IV — управления

4.4. Методы и средства измерения давления

По принципу действия ЧЭ средства измерения давления можно разделить на следующие **основные группы**:

1. Средства измерения давления, основанные на прямых абсолютных методах: поршневые манометры и ИПД, в том числе и грузопоршневые манометры, манометры с нецилиндрическим неуплотненным поршнем, колокольные, кольцевые и жидкостные манометры.

В первых трех манометрах метод измерений реализуется уравнением (1), основанным на определении величины давления по отношению силы к площади; в жидкостных манометрах - уравнением (2), основанным на уравнивании давления столбом жидкости.

2. Средства измерения давления, основанные на прямых относительных методах: деформационные манометры и ИПД, в том числе и с силовой компенсацией; полупроводниковые манометры и ИПД; манометры других типов, основанные на изменении физических свойств ЧЭ под действием давления.

3. Средства измерения давления, основанные на методах косвенных измерений: установки и приборы для определения давления по результатам измерения других физических величин; установки и приборы для определения давления по результатам измерения параметров физических свойств измеряемой среды (термопарные и ионизационные вакуумметры, ультразвуковые манометры, вязкостные вакуумметры и др.).

4.4. Методы и средства измерения давления

4.4.1. Методы прямых измерений давления

Жидкостные манометры

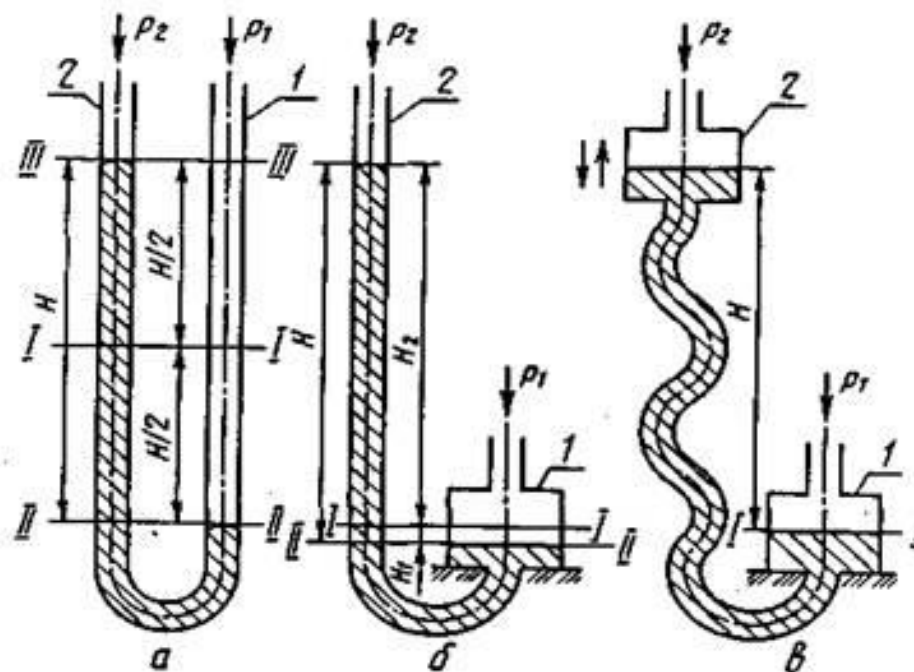


Рис. 4.21. Основные типы жидкостных манометров

4.4. Методы и средства измерения давления

Жидкостно-поршневые манометры

$$\left. \begin{aligned} \Delta p \cdot F \cdot R_1 &= m \cdot g \cdot R_2 \cdot \sin \alpha, \\ \Delta p &= H \cdot \rho \cdot g, \end{aligned} \right\}$$

где F — площадь перегородки (внутренняя площадь поперечного сечения тороида); R_1 — средний радиус тороида; R_2 — расстояние от оси вращения до центра тяжести противовеса; m — масса противовеса; g — ускорение свободного падения; α — угол поворота корпуса.

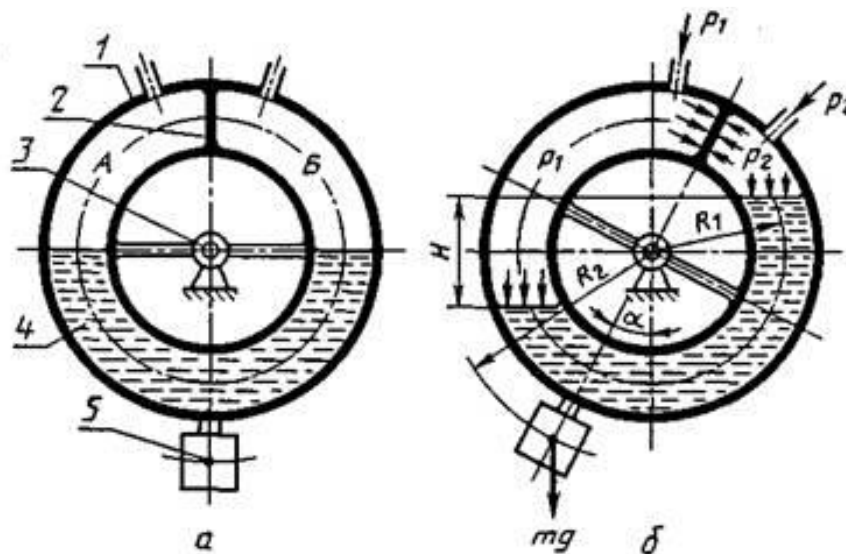


Рис. 4.22. Дифференциальный манометр типа „Кольцевые весы“

4.4. Методы и средства измерения давления

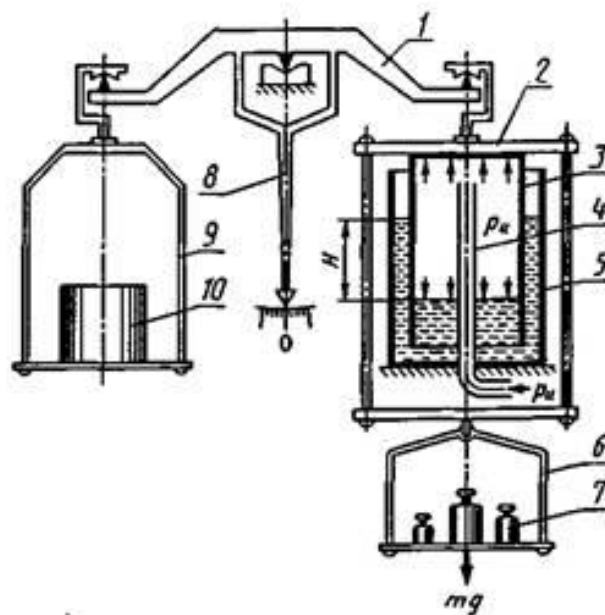


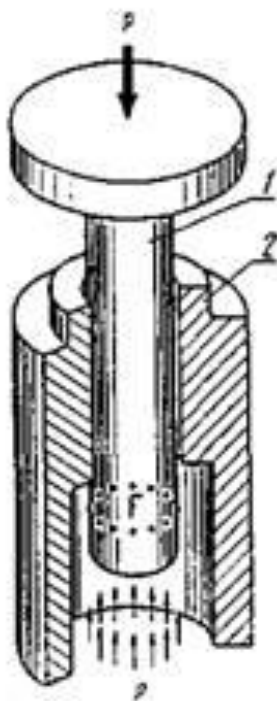
Рис. 4.23. Измерительная система манометра

Измерительной камерой прибора является внутренняя полость колокола, ограниченная дном и внутренней поверхностью цилиндрической части колокола и свободной поверхностью жидкости в его нижней части. При проведении измерений камера предварительно сообщается с атмосферным давлением и вес частично погруженного в жидкость колокола уравнивается тарировочным грузом 10.

4.4. Методы и средства измерения давления

Поршневые манометры

Поршневые манометры появились позже жидкостных. Впервые поршневой манометр был применен для измерения давления в 1833 г. Парротом и Ленцем (Российская Академия наук) при изучении сжимаемости воздуха и других свойств газов, причем значение давления для того времени было очень большим (10 МПа).



состоит из цилиндрического поршня 1, притертого к цилиндру 2 с минимально возможным зазором. Если на нижний торец поршня действует измеряемое давление p , то для его уравнивания к поршню должна быть приложена сила P . Уравнение равновесия с учетом силы трения на боковую поверхность поршня, возникшей при протекании жидкости или газа через зазор между поршнем и цилиндром под действием измеряемого давления, имеет вид

$$pF = P - T, \quad (4.28)$$

где F — геометрическая площадь поперечного сечения поршня; T — сила жидкостного трения на боковую поверхность поршня.

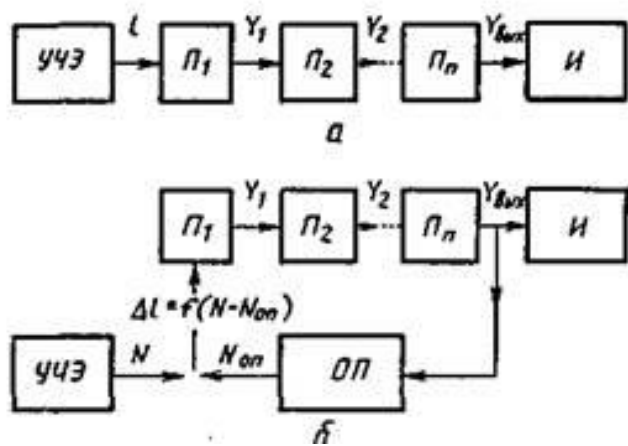
Рис. 4.24. Простейший поршневой манометр

4.4. Методы и средства измерения давления

Деформационные манометры

По мере развития промышленности, особенно в связи с появлением паровых машин и железных дорог, потребовались более удобные, чем жидкостные манометры приборы.

Первый деформационный манометр с трубчатым чувствительным элементом был изобретен случайно. Рабочий, при изготовлении змеевика для дистилляционного аппарата, сплющил поперечное сечение цилиндрической трубки, изогнутой по спирали. Тогда, чтобы восстановить форму трубки, один конец ее заглушили, а в другой конец насосом дали давление воды. При этом часть трубки с деформированным сечением приняла цилиндрическую форму, а спираль на этом участке разогнулась. Этот эффект был использован немецким инженером Шинцем, который в 1845 г. применил трубчатый чувствительный элемент для измерения давления.



Метод уравнивающего преобразования (рис. 4.26, б) характеризуется тем, что используются две цепи преобразователей: цепь прямого преобразования, состоящая из цепи промежуточных преобразователей $\Pi_1, \Pi_2, \dots, \Pi_n$, выходной сигнал которой $Y_{\text{вых}}$ поступает на указатель результата измерений И и, одновременно на цепь обратного преобразования, состоящей из преобразователя ОП. Метод уравнивания состоит в том, что усилие N , развиваемое УЧЭ, уравнивается усилием $N_{\text{оп}}$, создаваемым обратным преобразователем ОП выходного сигнала $I_{\text{вых}}$ цепи прямого преобразования.

Рис. 4.26. Методы измерения давления

4.4. Методы и средства измерения давления

Упругие чувствительные элементы деформационных манометров (УЧЭ)

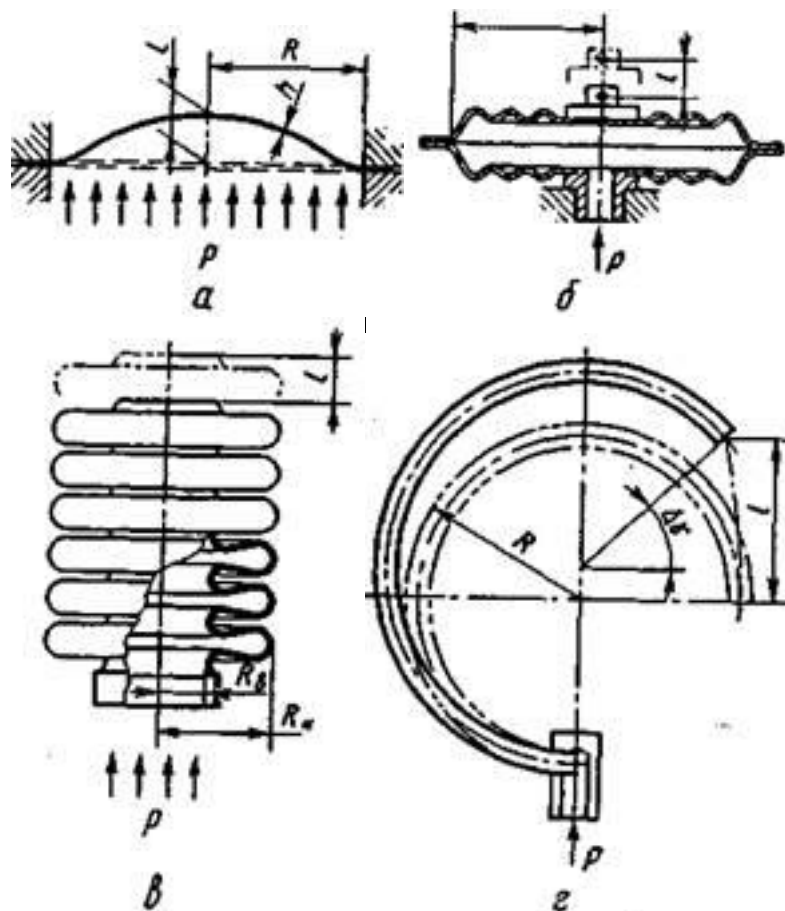


Рис. 4.27. Основные типы УЧЭ

4.4. Методы и средства измерения давления

Индуктивные и трансформаторные (взаимоиндуктивные) электромагнитные преобразователи

Индуктивными преобразователями называются преобразователи, преобразующие перемещение в изменение индуктивности магнитной цепи. Принцип действия преобразователя заключается в следующем (рис. 4.28). Преобразователь содержит магнитопроводы 1 и 2 с катушками Z_1 и Z_2 , между которыми помещен жесткий центр 3 мембраны. Катушки питаются напряжением переменного тока и включены в индуктивный мост, два дополнительных плеча которого составляют постоянные сопротивления Z_3 и Z_4 . В равновесном положении мост сбалансирован и сила тока I_k в диагонали моста равна нулю. При воздействии на мембрану давления жесткий центр сместится, что приведет к увеличению магнитного сопротивления магнитопровода 1 и уменьшению сопротивления магнитопровода 2, а вместе с тем и их полных электрических сопротивлений Z_1 и Z_2 . В результате разбаланса моста по диагонали последнего потечет ток I_k , пропорциональный перемещению центра мембраны, а следовательно, давлению.

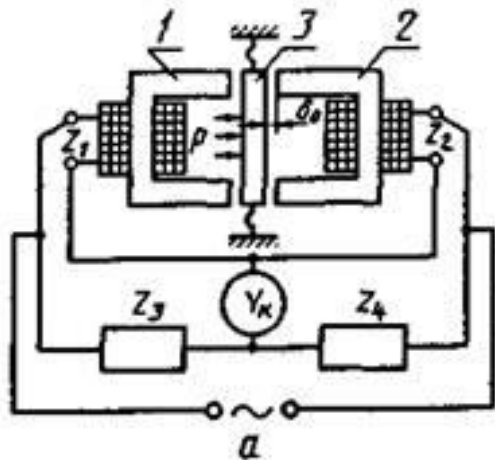


Рис. 4.28. Принцип действия индуктивного преобразователя

4.4. Методы и средства измерения давления

Резистивные деформационные манометры

Резистивные манометры основаны на изменении активного электросопротивления проводников при их механической деформации. Впервые этот эффект (тензоэффект) был рассмотрен английским физиком В. Томпсоном (лорд Кельвин) в 1856 г. Экспериментальные исследования тензоэффекта для различных металлов и сплавов были впервые проведены при давлениях до 300 МПа Лизелом (1903 г.), а затем при давлениях до 1300 МПа Бриджменом (1911г.). Однако широкое внедрение тензоресторной техники в промышленность началось со времен второй мировой войны.

Принципиальное отличие тензометрического метода измерения давления состоит в том, что мерой давления является не перемещение заданной точки УЧЭ в осевом направлении, а деформации поверхности УЧЭ или поверхности связанного с ним тела. Измерительный преобразователь, который преобразует деформации поверхности твердого тела в изменение его электросопротивления, называется тензорезистором.

Обычно выделяют следующие основные группы тензорезисторов: проволочные, фольговые, тонкопленочные и полупроводниковые. При этом находят применение два основных вида преобразования давления:

1. давление, воспринимаемое УЧЭ, вызывает деформацию его поверхности (растягивающую или сжимающую), которая преобразуется в изменение электросопротивления тензорезистора;

2. давление, воспринимаемое УЧЭ, преобразуется в сосредоточенную силу, которая деформирует упругое твердое тело с жестко связанным с ним тензорезистором; иногда производится промежуточное преобразование силы в момент сил.

4.4. Методы и средства измерения давления

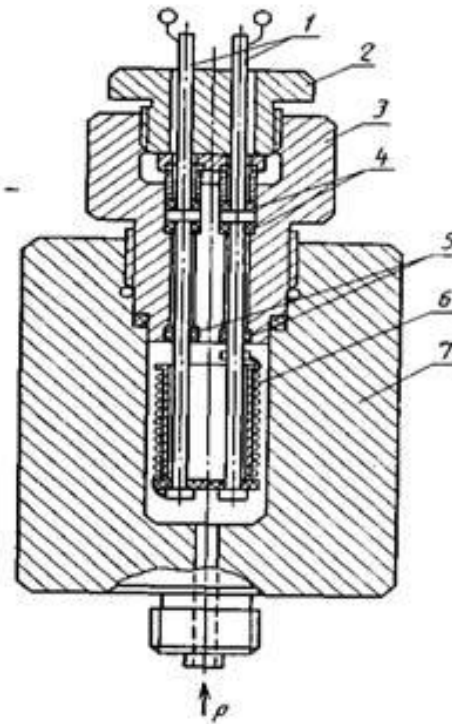


Рис. 4.29. Манганиновый манометр

В качестве материала проволочного сопротивления до настоящего времени применяется манганин (сплав меди, марганца и никеля), эффективность которого при создании тензоэффекта была выявлена исследованиями Лизела и Бриджмена еще в начале нашего века.

4.4. Методы и средства измерения давления

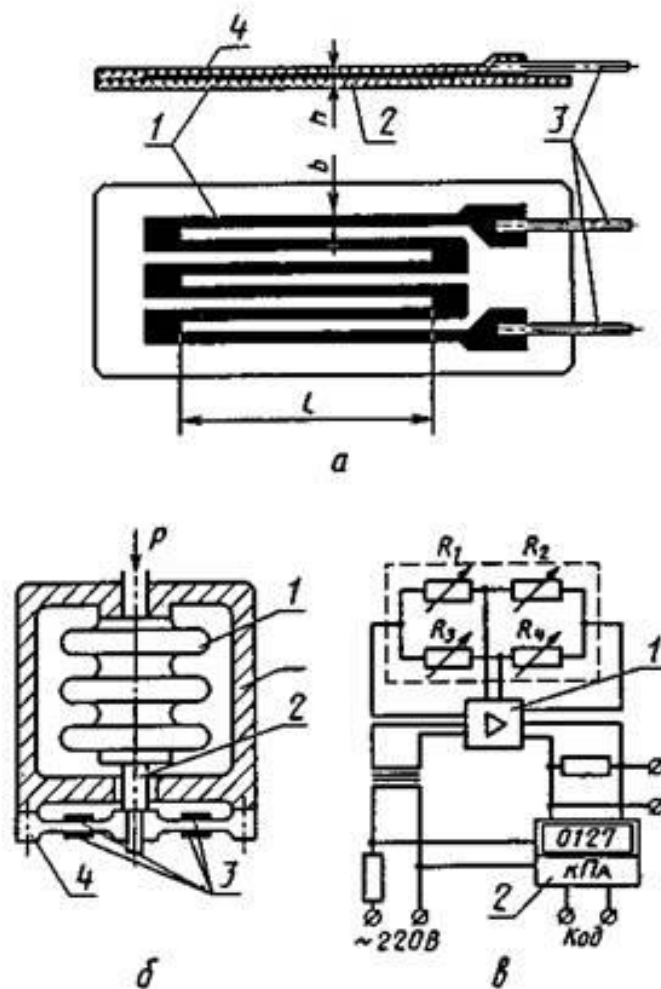


Рис. 4.30. Фольговый тензорезистор

4.4. Методы и средства измерения давления

4.4.2. Методы косвенных измерений давления

Косвенные методы, как правило, находят применение в тех случаях, когда прямые методы измерения давления трудно осуществимы, например, при измерении весьма малых давлений (вакуумные измерения) или при измерениях сверхвысоких давлений.

Косвенные методы, основанные на уравнении состояния идеального газа

Связь между важнейшими термодинамическими параметрами газа определяется соотношением

$$pV/T = \text{const}, \quad (4.29)$$

где p — абсолютное давление газа; T — абсолютная температура газа; V — объем, занимаемый газом.

Соотношение (4.29) называется объединенным газовым законом и формулируется следующим образом: при постоянной массе газа произведение объема на давление, деленное на абсолютную температуру газа, есть величина, одинаковая для всех состояний этой массы газа.

Уравнение состояния для произвольной массы идеального газа (уравнение Клайперона-Менделеева) имеет вид

$$pV = m \cdot RT/\mu, \quad (4.30)$$

где T — масса газа; μ — масса одного киломоля газа; R — универсальная газовая постоянная.

4.4. Методы и средства измерения давления

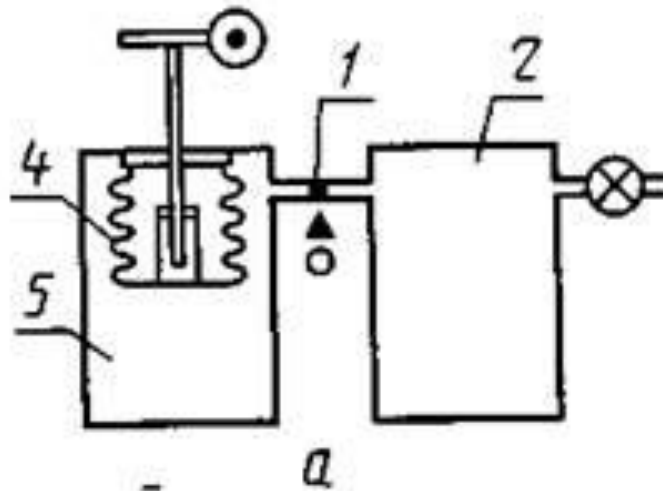


Рис. 4.30. Принципиальная схема газового барометра

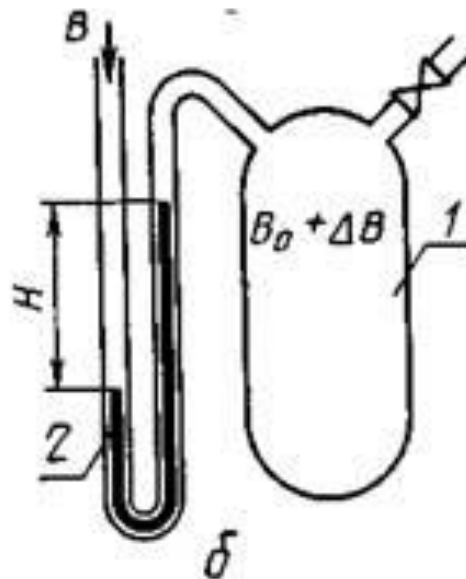


Рис. 4.31. Дифференциальный газовый барометр

4.4. Методы и средства измерения давления

Косвенные методы, основанные на фазовых переходах

Известно, что любое вещество в зависимости от давления и температуры может находиться в различных агрегатных состояниях (твёрдой, жидкой и газообразной фазах). Типовая диаграмма состояний в координатах p и T представлена на рис. 4.32. Кривыми линиями изображены границы между различными фазами (кривые равновесия фаз), соответствующие давлениям и температурам, при которых из одной фазы в другую переходит одинаковое число молекул.

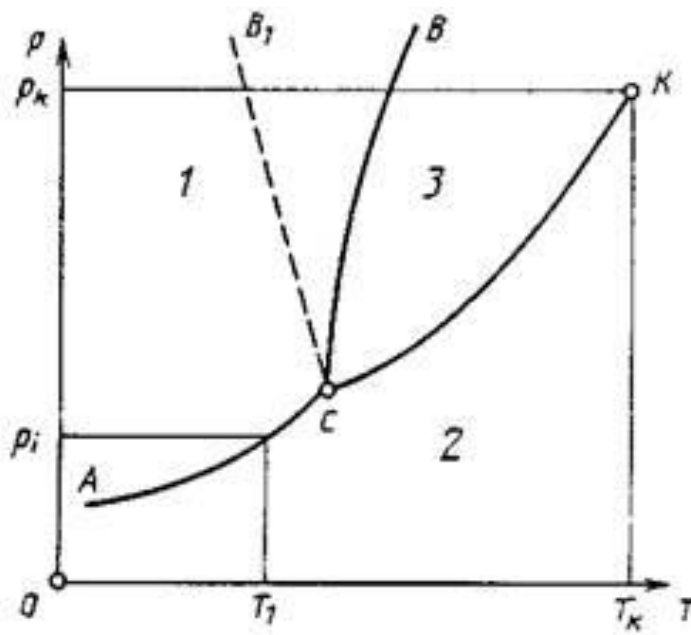


Рис. 4.32. Типовая диаграмма состояний

4.4. Методы и средства измерения давления

Косвенные методы, основанные на изменении физических свойств измеряемой среды

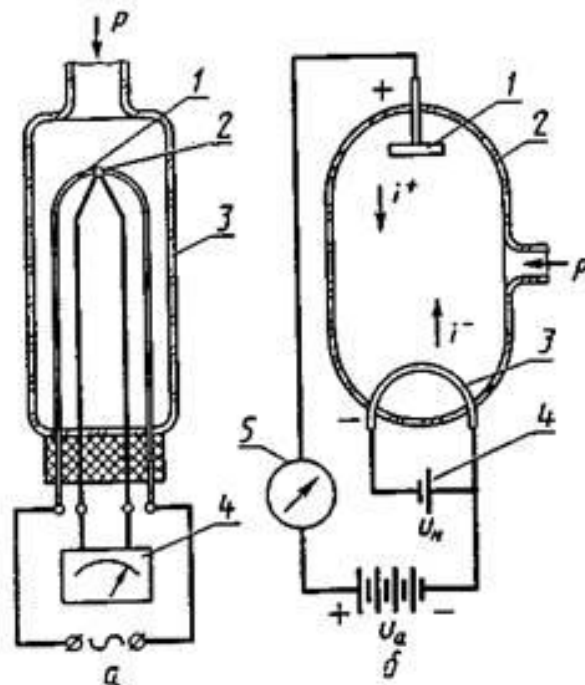


Рис. 4.33. Термопарный манометр

Термопарный манометр (рис. 4.33, а) так же, как и тепловой, основан на зависимости теплопроводности разреженного газа от давления. Манометр содержит стеклянную или металлическую колбу 3, в которой помещены нагреватель 1 и впаивая в него термопара 2. Нагреватель питается от источника переменного тока, и его температура, а следовательно, и температура термопары, определяется теплоотдачей в окружающий разреженный газ. Чем меньше давление газа, тем меньше его теплопроводность и тем больше температура, а следовательно, ЭДС на выходе термопары, которая и является мерой измеряемого давления.

4.5. Методы и средства измерения расхода

Расход – это количество вещества, протекающее через данное сечение в единицу времени. Количество можно измерять в единицах массы (кг, т) или единицах объема (м^3). Следовательно, расход можно измерять в единицах массы, деленных на единицу времени (кг/с, кг/мин, кг/ч, т/ч), или в единицах объема, также деленных на единицу времени ($\text{м}^3/\text{с}$, $\text{м}^3/\text{мин}$, $\text{м}^3/\text{ч}$). В первом случае имеем массовый расход, во втором - объемный расход.

Прибор для измерения расхода называют ***расходомерами***, а приборы для измерения количества - ***счетчиками количества*** (счетчиками).

4.5. Методы и средства измерения расхода

Классификация приборов для измерения расхода

В зависимости от принятого метода измерения приборы для измерения расхода и количества подразделяются на:

1. Расходомеры переменного перепада давления – основаны на измерении перепада давления, который образуется в результате местного изменения скорости потока жидкости, газа или пара.
2. Расходомеры постоянного перепада давления (расходомеры обтекания) – основаны на уравнивании обтекаемого тела потоком измеряемого вещества. Формы обтекаемых тел различны: поплавков, поршень, шар, диск, крыло и т.п. По конструктивным особенностям эти расходомеры подразделяются на ротаметры, поршневые и поплавковые расходомеры.
3. Электромагнитные расходомеры – основаны на законе электромагнитной индукции, согласно которому в проводнике, движущемся в магнитном поле, будет наводиться э. д. с, пропорциональная скорости движения проводника.
4. Ультразвуковые расходомеры – основаны на сложении скорости распространения ультразвука в жидкости и скорости самого потока жидкости. Излучатель и приемник ультразвуковых импульсов расходомера располагают на торцах измерительного участка трубопровода.
5. Тахометрические расходомеры – основаны на преобразовании скорости потока в угловую скорость вращения обтекаемого элемента. Подразделяются на турбинные, шариковые и камерные.
6. Расходомеры переменного уровня – основаны на зависимости уровня жидкости в сосуде от расхода при свободном истечении ее через калиброванное отверстие (щель) в дне или боковой стенке.
7. Тепловые расходомеры – основаны на использовании зависимости эффекта теплового воздействия на поток вещества от массового расхода этого вещества.
8. Вихревые расходомеры – основаны на зависимости от расхода частоты колебаний давления среды, возникающих в потоке в процессе вихреобразования.

4.5. Методы и средства измерения расхода

4.5.1. Расходомеры переменного перепада давления

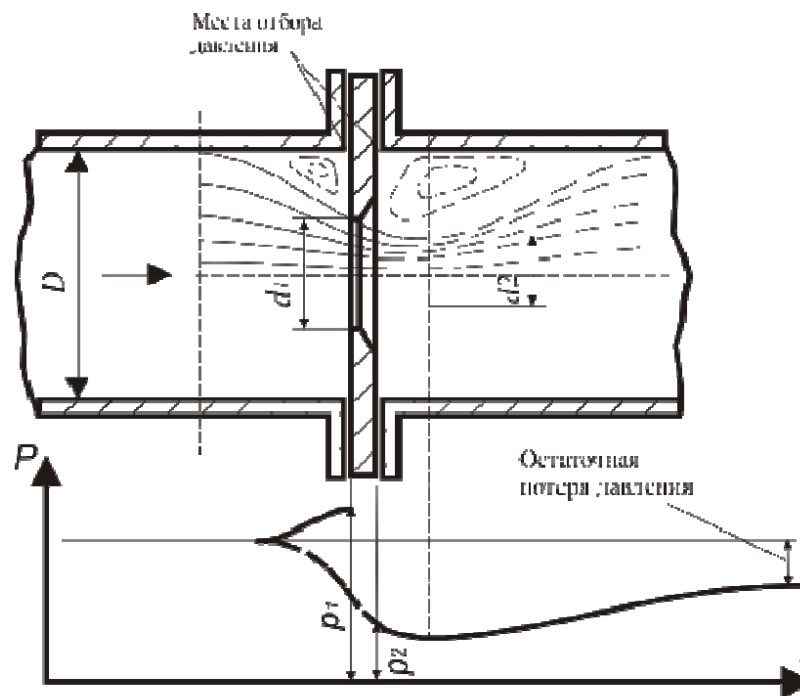


Рис. 4.34. Схема измерения расхода методом дросселирования потока

Расход вещества, соответствующий наибольшему перепаду давления ΔP (Н/м²) в сужающем устройстве, рассчитывается по формулам:

$$Q_0 = \alpha F_0 \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}}, \text{ м}^3/\text{с};$$

$$Q_m = \alpha F_0 \sqrt{2\rho\Delta p}, \text{ кг/с},$$

где Q_0 — объёмный расход; Q_m — массовый расход; α — коэффициент расхода; F_0 — площадь отверстия сужающего устройства.

4.5. Методы и средства измерения расхода

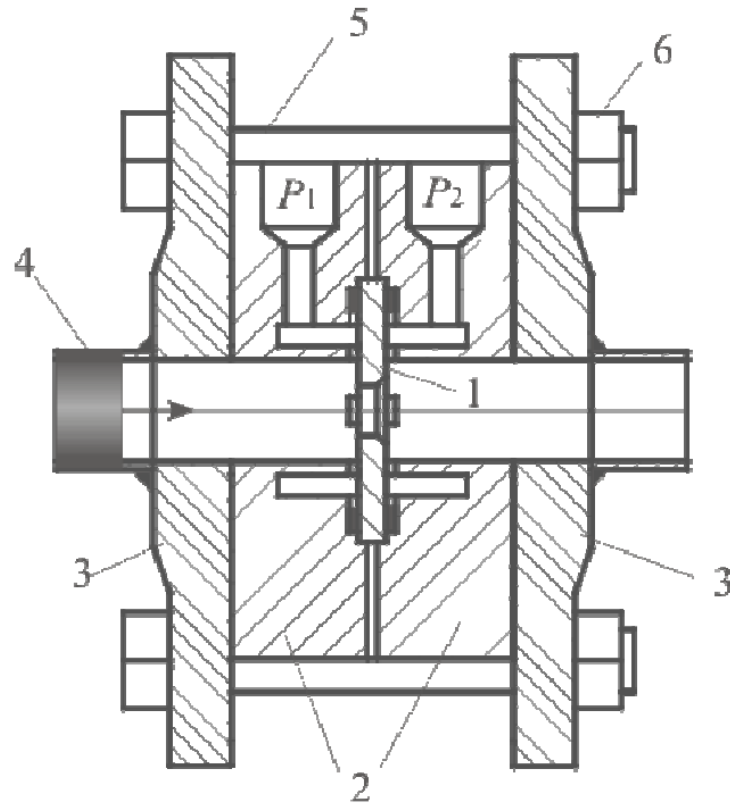


Рис. 4.35. Устройство камерной диафрагмы

4.5. Методы и средства измерения расхода

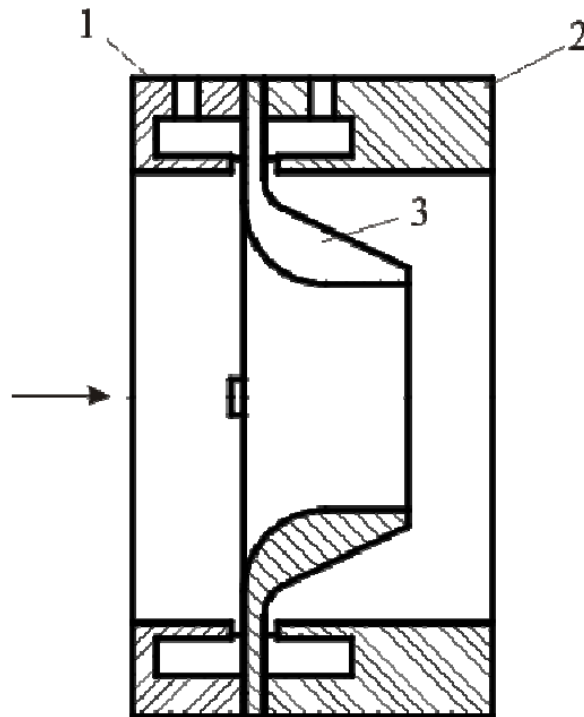


Рис. 4.36. Нормальное сопло (стрелкой указано направление потока)

4.5. Методы и средства измерения расхода

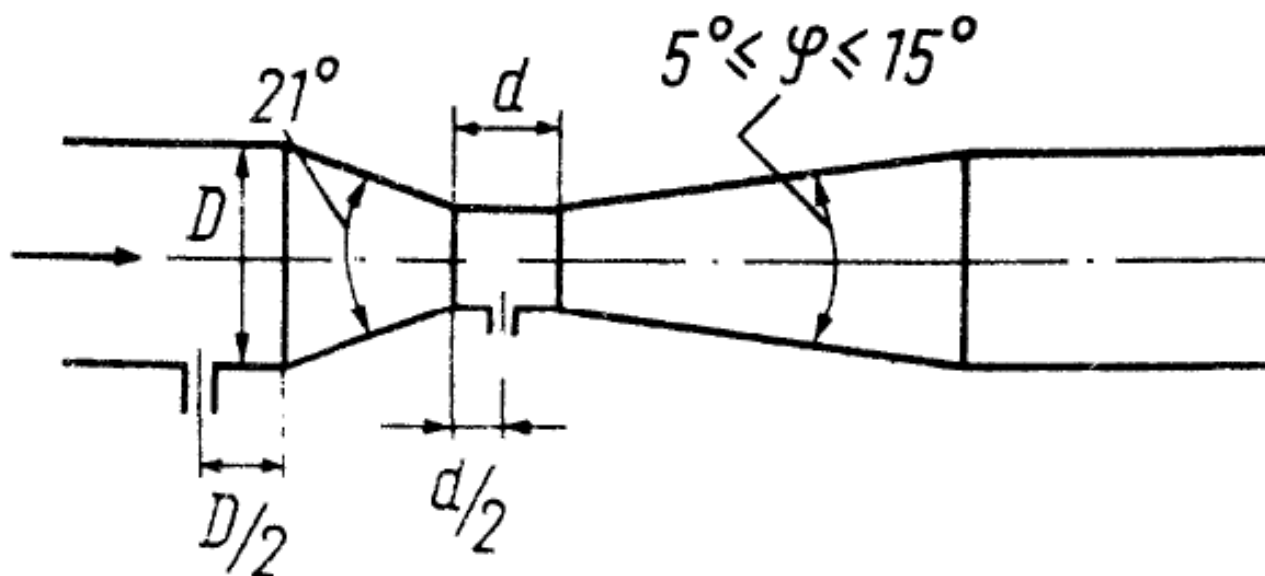


Рис. 4.37. Нормальная труба Вентури

4.5. Методы и средства измерения расхода

4.5.2. Расходомеры постоянного перепада давления

Ротаметры предназначены для измерения объёмного расхода плавно меняющихся однородных потоков чистых или слабозагрязнённых жидкостей и газов с дисперсными включениями.

Принцип действия ротаметров (стеклянных и металлических), основан на восприятии динамического давления потока измеряемой среды чувствительным элементом ротаметра – поплавком, помещённым в коническую трубу, по которой вверх проходит поток измеряемой среды.

Каждому значению расхода среды, проходящему через ротаметр при определённой плотности и кинематической вязкости, соответствует вполне определённое положение поплавка. При этом перепад давлений ΔP под поплавком и над ним остаётся величиной постоянной и равной:

$$\Delta P \cong \frac{mg}{S} \cong const$$

где mg – сила тяжести, действующая на поплавок; S – площадь наибольшего поперечного сечения поплавка

4.5. Методы и средства измерения расхс

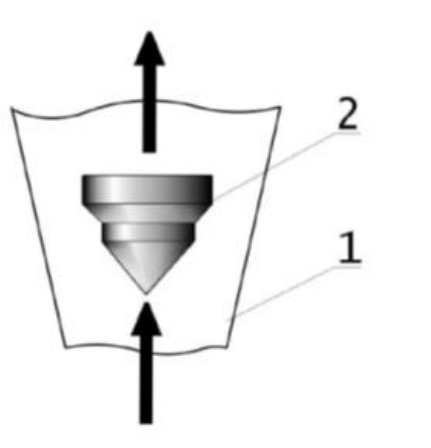


Рис. 4.38. Схема ротаметра с конической трубк

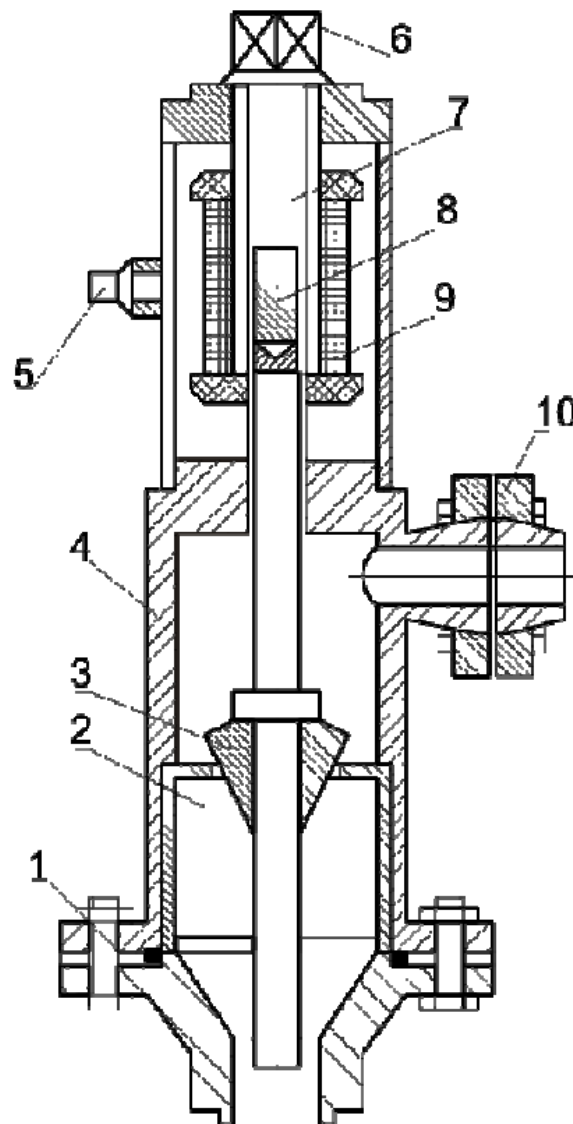


Рис. 4.39. Схема ротаметра электрического дистанционного РЭ:
1, 10 – входной и выходной штуцеры; 2 – дисковое седло; 3 – конический поплавок; 4 – корпус; 5 – итекерный разъем; 6 – винт установки нуля; 7 – разделительная трубка; 8 – плунжер; 9 – дифференциально-трансформаторный преобразователь

4.5. Методы и средства измерения расхода

4.5.3. Электромагнитные расходомеры

Принцип действия расходомера основан на явлении электромагнитной индукции (рис. 4.40).

Если электропроводная жидкость движется в магнитном поле, создаваемом электромагнитной системой 1, то между электродами 2 возникает ЭДС:

$$E = BvD ,$$

где B – индукция магнитного поля, создаваемого электромагнитной системой; v – средняя скорость потока жидкости; D – расстояние между электродами. Обычно B и D являются постоянными величинами, поэтому ЭДС E зависит только от средней скорости потока жидкости, а значит и объёмного расхода жидкости.

4.5. Методы и средства измерения расхода

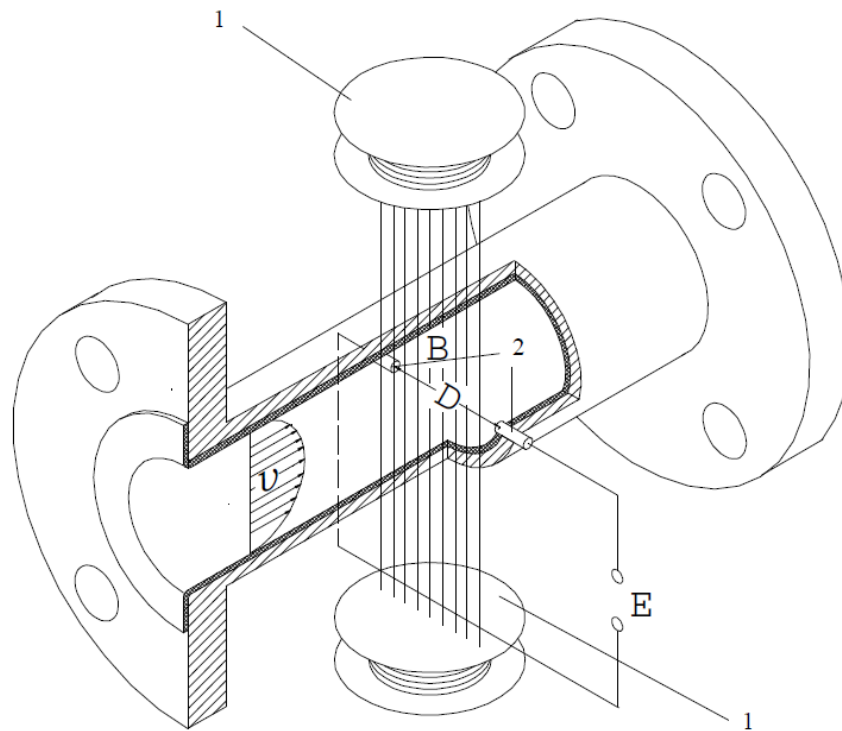


Рис. 4.40. Схема электромагнитного расходомера

4.5. Методы и средства измерения расхода

4.5.1. Ультразвуковые расходомеры

Принцип действия *временн*пульсных *ультразвуковых расходомеров* основан на временнпульсном методе измерения расхода. При реализации этого метода ультразвуковые импульсы поочерёдно передаются вверх и вниз по течению потока. Разность времён распространения пропорциональна скорости течения потока.

В состав прибора входят (рис. 4.41):

- два первичных ультразвуковых преобразователя расхода, состоящих из двух пар пьезоэлектрических преобразователей (ПЭП), установленных на трубопроводе условным диаметром 15...1800 мм;
- вторичный преобразователь – электронный блок.

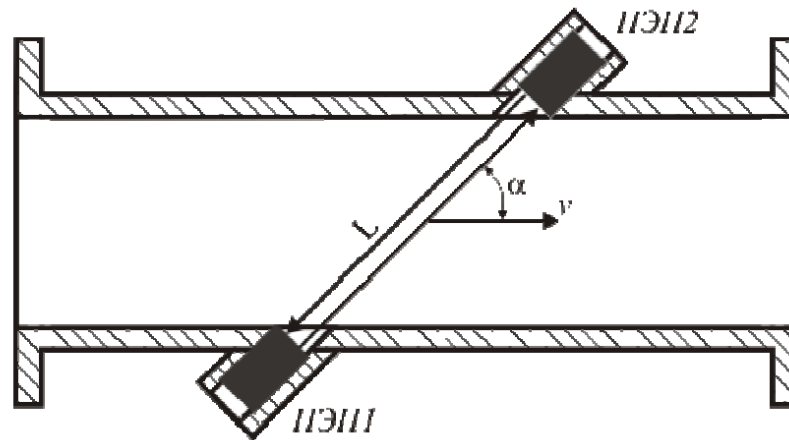


Рис. 4.41. Схема датчика ультразвукового расходомера.

4.5. Методы и средства измерения расхода

Скорость распространения ультразвукового сигнала в среде, заполняющей трубопровод, представляет собой сумму скоростей ультразвука в неподвижной воде и скорости потока воды v в проекции на рассматриваемое направление распространения ультразвука. Время распространения ультразвукового импульса от ПЭП1 к ПЭП2 и от ПЭП2 к ПЭП1 зависит от скорости движения среды в соответствии с формулами (3.1) и (3.2):

$$t_1 = \frac{L}{C_0 + v \cos \alpha}, \quad (3.1)$$

$$t_2 = \frac{L}{C_0 - v \cos \alpha}, \quad (3.2)$$

где t_1, t_2 – время распространения ультразвукового импульса по потоку и против потока; L – длина активной части акустического канала; C_0 – скорость ультразвука в неподвижной среде; v – скорость движения воды в трубопроводе; α – угол в соответствии с рис. 4.41.

В приборе используется метод прямого измерения времени распространения каждого индивидуального ультразвукового импульса от одного ПЭП к другому.

Из формул (3.1) и (3.2) получаем

$$v = \frac{\Delta t c_0^2}{2L_A \cos \alpha}, \quad \Delta t = t_2 - t_1, \quad (3.3)$$

где Δt – разность времени распространения ультразвуковых импульсов по потоку и против потока.

4.5. Методы и средства измерения расхода

4.5.5. Расходомеры переменного уровня (щелевые расходомеры)

Щелевые расходомеры (дозаторы) используют для измерения расхода агрессивных, загрязнённых или многофазных жидкостей.

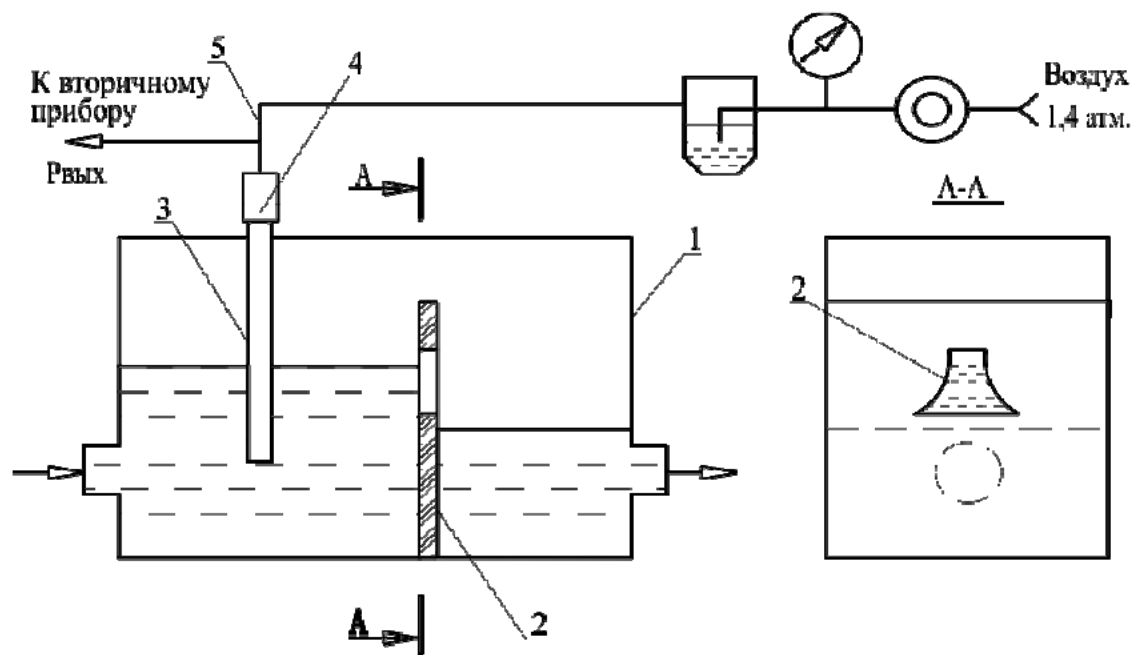


Рис. 3.3. Щелевой расходомер ДРЩ-Т (дозатор):

1 – корпус; 2 – профильная щель; 3 – пьезотрубка; 4 – регулировочная гайка; 5 – питающая линия.

4.5. Методы и средства измерения расхода

4.5.6. Тепловые расходомеры

Тепловой расходомер основан на нагреве потока жидкости или газа посторонним источником энергии, создающим в потоке разность температур, зависящую от скорости потока и от расхода тепла в нагревателе. Разница температур между этими датчиками зависит от массового расхода. Как правило, расходомеры подобного типа состоят из двух температурных датчиков, один из которых смонтирован выше по потоку, а другой – ниже по потоку по отношению к нагревателю (рис. 3.16).

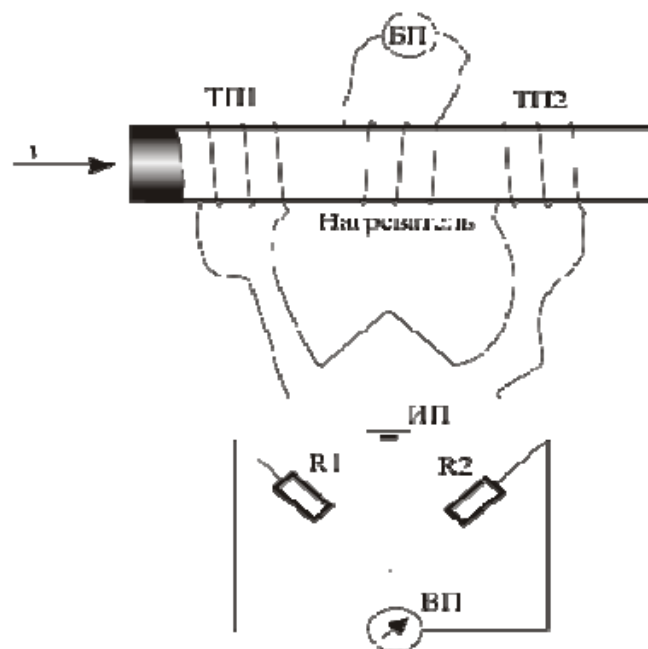


Рис. 3.16. Тепловой расходомер

4.5. Методы и средства измерения расхода

Вихревой расходомер – это расходомер, основанный на зависимости от расхода частоты образования вихрей, возникающих в потоке в процессе обтекания тела.

Когда поток жидкости обтекает тело, слои жидкости, прилегающие к поверхности тела, замедляются. Для обтекаемого тела эти пограничные слои следуют за контуром тела до места их встречи за объектом. В этом случае в потоке возникают небольшие возмущения. Для плохо обтекаемых тел пограничные слои отрываются от тела намного раньше и создают большие возмущения в потоке. Когда пограничный слой отходит от поверхности тела, он закручивается в вихри. Эти вихри, называемые **вихрями Кармана**, генерируются попеременно с верхней и нижней поверхности тела (рис. 3.11). В результате возникают два параллельных ряда вихрей, движущихся вниз по потоку с одинаковым расстоянием между вихрями в каждом ряду. Количество вихрей, генерируемое в секунду f от каждой стороны поверхности обтекаемого тела, можно определить как

$$f = \frac{Sv_s}{d},$$

где v_s – средняя скорость жидкости вблизи плохо обтекаемого тела; S – фактически постоянная величина, называемая числом Струхала. Поток жидкости у тела протекает через площадь, равную

$$(\pi D^2/4) - F_d.$$

где D – диаметр трубы. Предполагается, что тело имеет прямоугольную поверхность поперечного сечения шириной d , расположенную в диаметральной плоскости трубы, и его эффективная площадь равна примерно F_d .

4.5. Методы и средства измерения расхода

Скорость v_s в этом месте определяется скоростью v на некотором удалении от тела, и объёмный расход Q может быть определен как

$$Q = (\pi D^2 / 4)v = (\pi D^2 / 4 - F_d)v_s,$$

следовательно

$$f = \frac{SD^2v}{\pi D^2 - F_d} = \frac{SD^2Q}{(\pi D^2 / 4)(\pi D^2 / 4 - F_d)} = \frac{4SQ}{\pi D^2 d [1 - (4d / \pi D)]}.$$

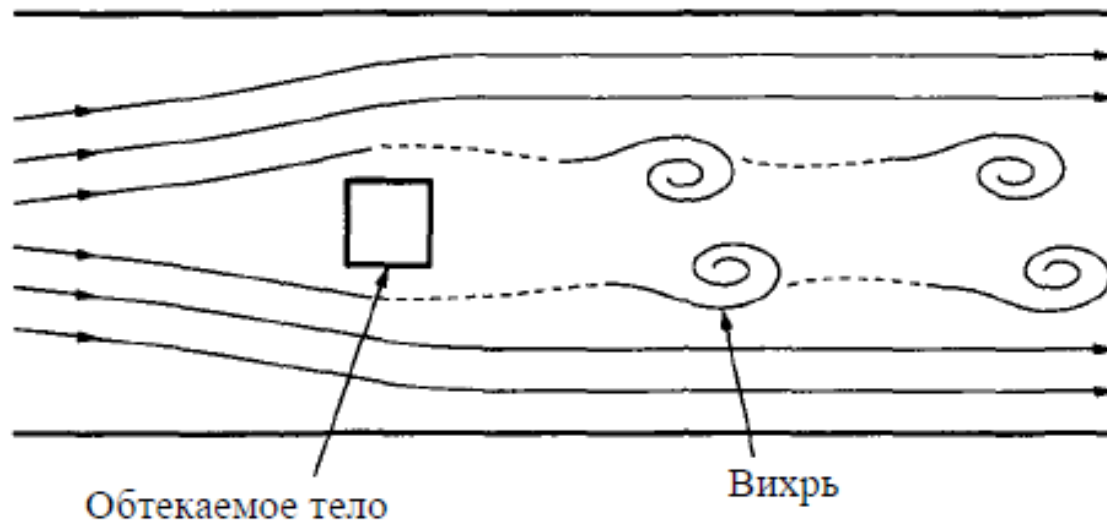


Рис. 3.11. Образование вихрей.

4.5. Методы и средства измерения расхода

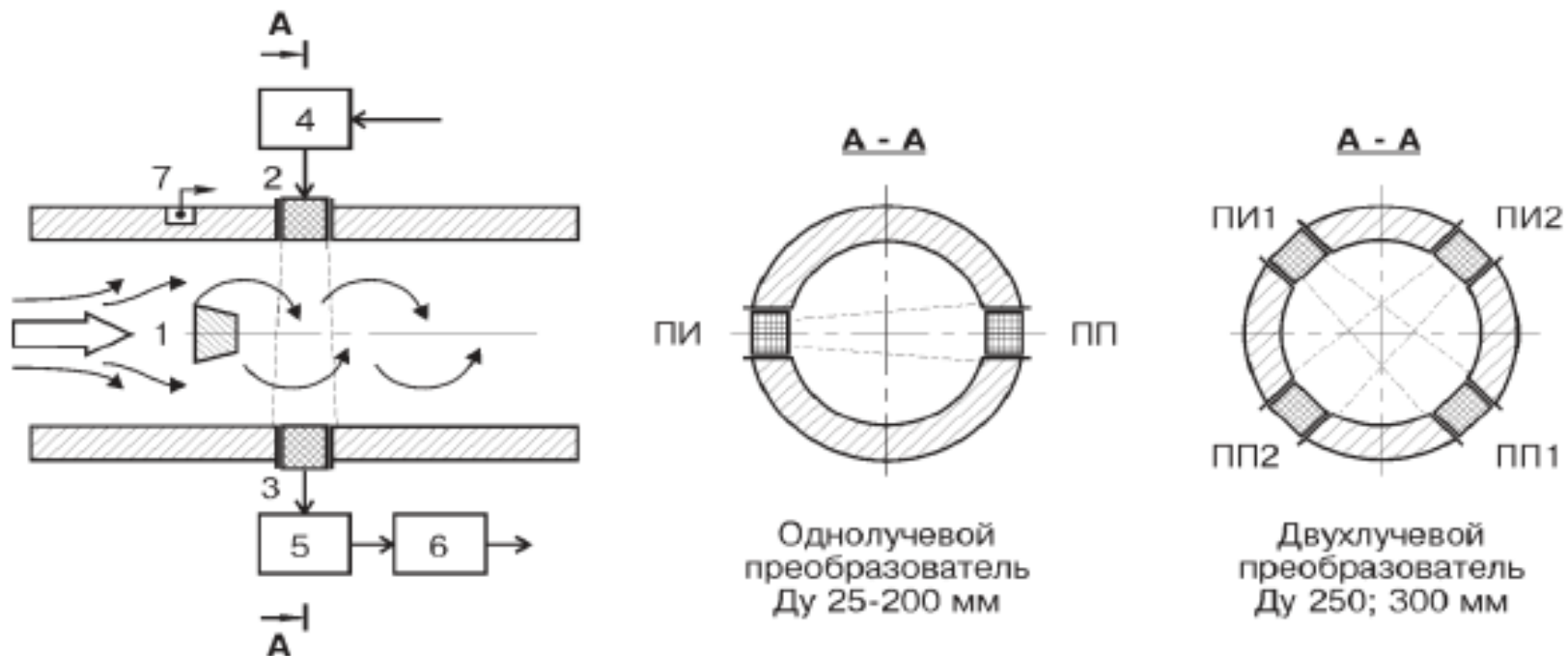


Рис. 3.12. Вихреакустические расходомеры

4.5.8. Кориолисовы расходомеры

Законами механики установлено, что на массу m , движущуюся со скоростью $\vec{v}$ относительно системы отсчёта, находящейся во вращательном движении с угловой скоростью $\vec{\omega}$, действует сила $\vec{f}_c$, называемая силой Кориолиса (Г. Кориолис (1792 – 1843) – французский физик).

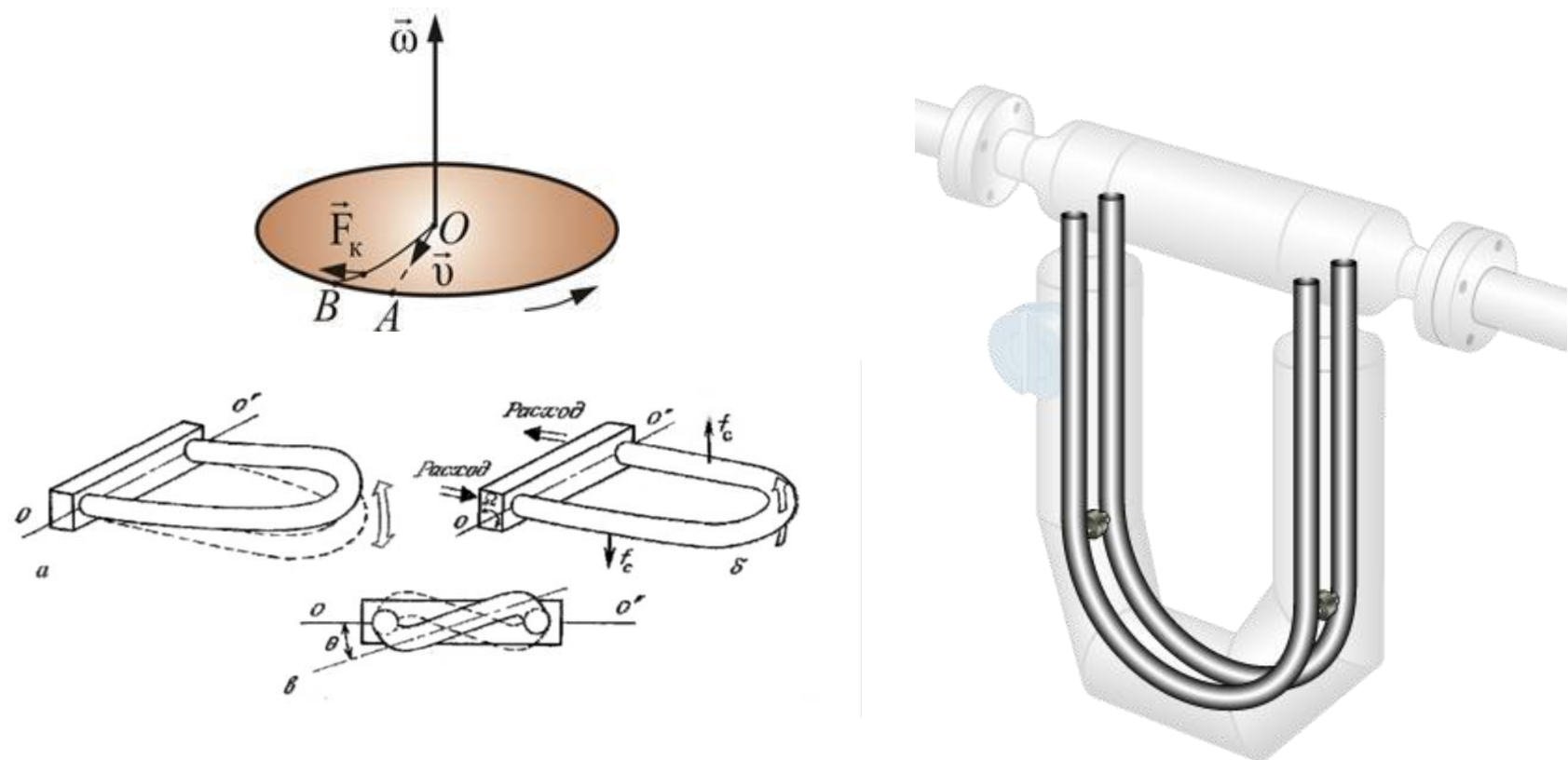


Рис.4.50. Чувствительный элемент кориолисовых расходомеров:
а – при отсутствии расхода; б – при наличии расхода;
в – вид на чувствительный элемент спереди при наличии расхода.

Рекомендуемая литература

1. Методы и средства измерений, испытаний и контроля : учебное пособие. В 5 ч. / А.Г. Дивин, С.В. Пономарев, Г.В. Мозгова. – Тамбов : Изд-во ФГБОУ ВПО «ТГТУ», 2012. – Ч. 2. –108 с.
2. Зайцев, С.А. Контрольно-измерительные приборы и инструменты : учебное пособие / С.А. Зайцев, Д.Д. Грибанов, А.Н. Толстов, Р.В. Меркулов. – М. : Издательский центр «Академия», 2006. – 464 с.
3. Раннев, Г.Г. Методы и средства измерений : учебник для вузов / Г.Г. Раннев, А.П. Тарасенко. – 3-е изд., стер. Издательский центр «Академия», 2006. – 336 с.
4. Харт, Х. Введение в измерительную технику / Х. Харт ; пер. с нем. – М.: Мир, 1999. – 391 с.
5. Ключев, В.В. Неразрушающий контроль и диагностика: справочник / под ред. В.В. Ключева. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 2005. – 656 с.
6. Эткин, Л.Г. Виброчастотные датчики. Теория и практика / Л.Г. Эткин. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. – 408 с.
7. Болтон, У. Карманный справочник инженера метролога / У. Болтон. – М. : Издательский дом «Додэка-XXI», 2002. – 384 с.].