

2. ПРИБОРЫ ИЗМЕРЕНИЯ РАСХОДА ПАРА, ЖИДКОСТИ И ГАЗА

Общие сведения

Измерение расхода жидкостей, газов и других сред играют огромную роль в различных областях промышленности. При определении мощности, производительности и коэффициента полезного действия (КПД) энергетических установок, контроле и управлении производственными процессами требуется точное и надежное измерение расхода различных жидких, сыпучих и газообразных веществ. Установка приборов учета, как показывает опыт, даже без проведения энергосберегающих мероприятий позволяет значительно снизить затраты энергоносителей и воду. Исходя из опыта установки водосчетчиков, потребление холодной и горячей воды в результате может достигать 30-50%.

Расход жидкости, сыпучих веществ, газа – физическая величина, равная пределу отношения приращения массы или объема, или количества жидкости (сыпучих веществ, газа), протекающих в трубопроводе через сечение, перпендикулярное направлению скорости потока, к интервалу времени, за который это приращение произошло, при неограниченном уменьшении интервала времени. Количество измеряют в единицах объема (м^3 , см^3) или массы (т, кг, г). Соответственно может измеряться объемный ($\text{м}^3/\text{с}$, $\text{м}^3/\text{ч}$, $\text{см}^3/\text{с}$) или массовый (кг/с, кг/ч, г/с) расход.

Измерение различных расходов сред принципиально подразделяется на измерение скорости потока (протока) в открытых объемах, например, в каналах и измерение расхода в ограниченных (закрытых) объемах, например, в трубах. В случае, если известна скорость потока в конкретной трубе, то исходя из этой скорости потока, имеется возможность рассчитать расход среды в этой трубе. Для измерения расхода в вихревых, турбулентных или пульсирующих потоках среды дополнительно необходимо определение временных разрешений (интервалы, частота) для выяснения средней величины этого расхода.

Прибор, измеряющий расход, т. е. количество вещества, проходящее в трубопроводах в единицу времени, называют расходомером. Если расходомер снабжен суммирующим устройством со счетчиком, он служит для одновременного измерения расхода и количества вещества и называется счетчиком количества.

Измерение расхода и количества является не простой задачей, поскольку на показания приборов влияют физические свойства измеряемых потоков: плотность, вязкость, соотношение фаз в потоке и т. п. Физические

свойства измеряемых потоков, в свою очередь, зависят от условий эксплуатации, в первую очередь от температуры и давления.

Устройство многих расходомеров сконструировано таким образом, что оно вызывает изменение физических параметров измеряемой среды, например, снижение давления, увеличение сопротивления и температуры. Другие расходомеры уже изначально конструктивно располагают внутренними инородными телами (сенсорами), что приводит к загрязнению внутренней поверхности расходомера и самого датчика. Кроме того, на процесс измерения, могут влиять температурные, химические и другие физические параметры измеряемой среды: плотность, вязкость и ее электропроводимость. Если условия эксплуатации расходомера отличаются от условий, при которых производилась его градуировка, то ошибка в показаниях прибора может значительно превысить допустимое значение. Поэтому для серийно выпускаемых приборов установлены ограничения области их применения: по свойствам измеряемого потока, максимальной температуре и давлению, содержанию твердых частиц или газов в жидкости и т. п.

Правильный выбор типа расходомера для каждой конкретной среды, с учетом ее физико-химических параметров, играет существенную роль для определения точности результатов замеров, эффективности использования расходомера, периодичности и стоимости технического обслуживания, а также для увеличения ресурса работы самого расходомера.

Расходомеры условно можно разделить на следующие общие группы:

Механические – турбинные, крыльчатые, шестеренчатые, винтовые и роliko-поршневые;

Расходомеры без движущихся механических частей – калометрические, тепловые, дифференциальные, кориолисовые, вихревые, магнитно-индуктивные;

Универсальные – для измерения жидкостей, газов, желеобразных и пылеобразных сред, например, кориолисовые расходомеры;

Расходомеры для измерения массы и объемного расхода – кориолисовые и вихревые расходомеры;

Автономные расходомеры – работа расходомера осуществляется без подключения внешнего источника питания.

Расходомеры, не требующие технического обслуживания – кориолисовые, вихревые, магнитно-индуктивные, цифровые.

Ряд устройств, измеряющих расход, не имеет электронных компонентов. В расходомерах такого типа скорость потока может измеряться, например, путём определения скорости вращения механической турбины при погружении её в поток. Вал турбинки или другого

преобразователя расхода через зубчатый редуктор соединяется со счетным механизмом.

Весьма популярны расходомеры обтекания. Это приборы, у которых под воздействием динамического давления потока перемещается обтекаемое тело (диск, поплавков, поршень). Большинство расходомеров сконструированы таким образом, что обтекаемое тело перемещается вдоль вертикальной оси. Но в ряде приборов обтекаемое тело в виде лопасти или диска поворачивается вокруг оси подвеса.

Расходомеры обтекания подразделяют на группы:

1. Расходомеры постоянного перепада давления – поплавков в расходомере перемещается вертикально, а сила сопротивления потоку создается за счет веса поплавка.

2. Расходомеры с изменяющимся перепадом давления – имеют еще и пружину, которая противодействует потоку и обтекаемое тело может перемещаться в различных плоскостях.

3. Расходомеры с поворотной лопастью – сопротивление потоку создается не только весом подвижной части, но еще и пружиной.

Механические расходомеры (Рис. 2.1) довольно дешевы, однако их точность, как правило, не велика. Помимо низкой точности, их недостатком является наличие подвижных частей, препятствующих потоку жидкости или газа, что также снижает точностные характеристики приборов данного типа.



Рис. 2.1. Неэлектрические расходомеры

Классификация расходомеров по принципу действия возможна в соответствии с рис. 2.2.

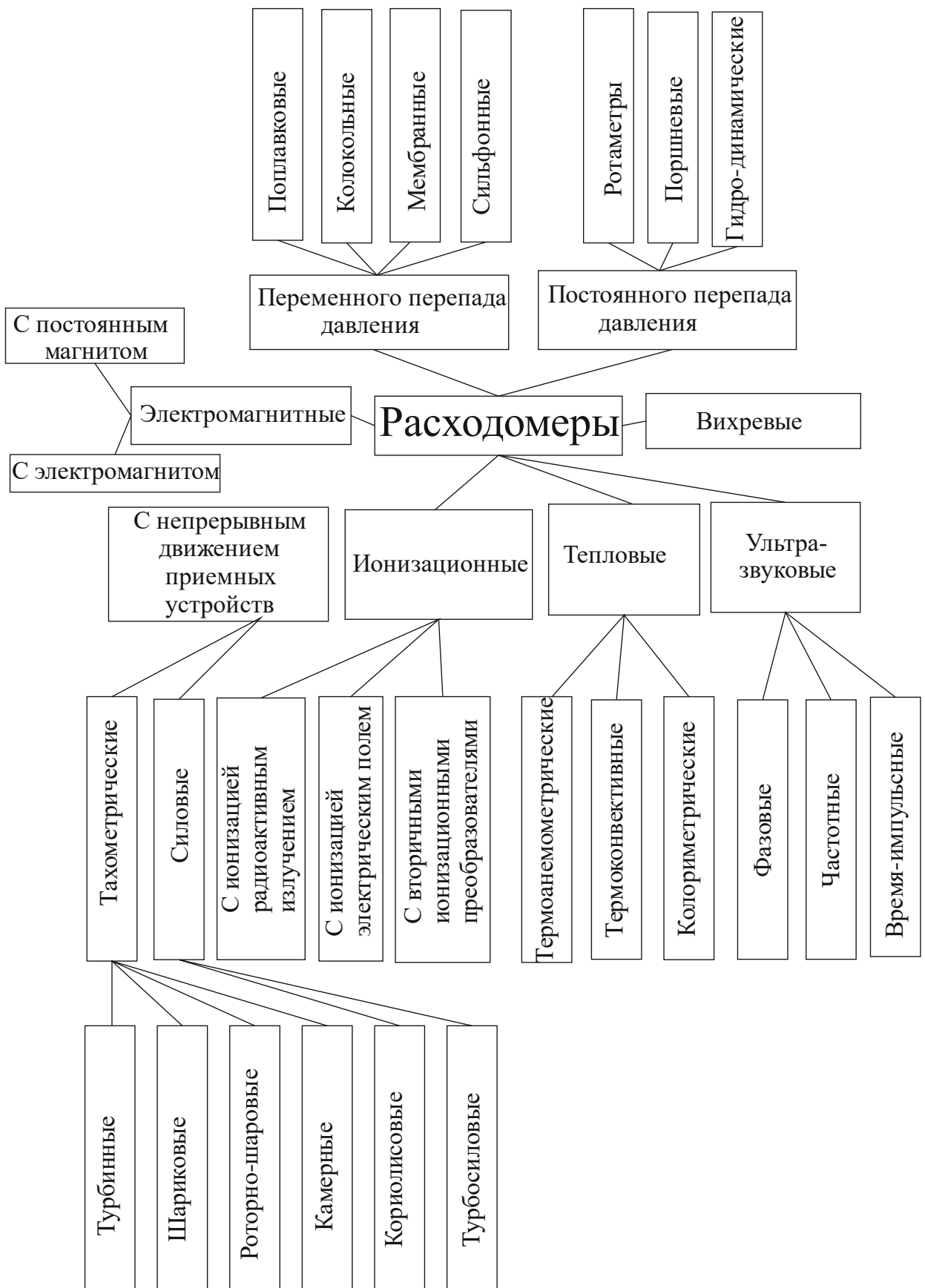


Рис. 2.2. Классификация расходомеров по принципу действия

2.1. РАСХОДОМЕРЫ ПЕРЕМЕННОГО ПЕРЕПАДА ДАВЛЕНИЯ

Одним из наиболее распространенных средств измерений расхода жидкостей и газов (паров), протекающих по трубопроводам, являются расходомеры переменного перепада давления, состоящие из стандартного сужающего устройства, дифманометра, приборов для измерения параметров среды и соединительных линий. В комплект расходомерного устройства также входят прямые участки трубопроводов до и после сужающего устройства с местными сопротивлениями.

Сужающее устройство расходомера является первичным измерительным преобразователем расхода, в котором в результате сужения сечения потока измеряемой среды (жидкости, газа, пара) образуется перепад (разность) давления, зависящий от расхода. В качестве стандартных (нормализованных) сужающих устройств применяются измерительные диафрагмы, сопла Вентури и трубы Вентури. В качестве измерительных приборов применяются различные дифференциальные манометры, снабженные показывающими, записывающими, интегрирующими, сигнализирующими и другими устройствами, обеспечивающими выдачу измерительной информации о расходе в соответствующей форме и виде.

Измерительная диафрагма расходомеров жидких и газообразных сред, работающих по методу переменного перепада давлений представляет собой диск, установленный в стандартных сужающих устройствах так, что центр его лежит на оси трубопровода. При протекании потока жидкости или газа (пара) в трубопроводе с диафрагмой сужение его начинается до диафрагмы. На некотором расстоянии за ней под действием сил инерции поток сужается до минимального сечения, а далее постепенно расширяется до полного сечения трубопровода. Перед диафрагмой и после нее образуются зоны завихрения. Давление струи около стенки вначале возрастает из-за подпора перед диафрагмой. За диафрагмой оно снижается до минимума, затем снова повышается, но не достигает прежнего значения, так как вследствие трения и завихрений происходит потеря давления.

Таким образом, часть потенциальной энергии давления потока переходит в кинетическую. В результате средняя скорость потока в суженном сечении повышается, а статическое давление в этом сечении становится меньше статического давления перед сужающим устройством. Разность этих давлений (перепад давления) служит мерой расхода протекающей через сужающее устройство жидкости, газа или пара. Через специальные отверстия производится измерение статических давлений до и после сужающего устройства.

Для практического использования применяют следующие уравнения для определения объемного Q и массового расхода Q_m :

$$Q = 0,01252 \cdot a \cdot \varepsilon \cdot d^2 \sqrt{\Delta p / \rho}$$

$$Q_m = 0,01252 \cdot \varepsilon \cdot d^2 \sqrt{\Delta p / \rho}$$

где ε – поправочный множитель, учитывающий изменение плотности среды; a – коэффициент расхода, безразмерная величина, определяемая экспериментально, показывает, во сколько раз действительный расход отличается от теоретического; d – диаметр сужающего отверстия, м; ρ – плотность жидкости, кг/м³; Δp – перепад давления, создаваемый сужающим устройством, Па.

Благодаря моноблочной конструкции процесс установки на измерительный участок трубопровода и ввода расходомеров в эксплуатацию относительно несложен. В комплект поставки расходомеров обычно входят присоединительные патрубки, предназначенные для сварки в трубопровод и габаритный эквивалент расходомера (Рис. 2.3).



a



б

Рис. 2.3. Трубопровод:
a – с эквивалентом расходомера,
б – с расходомером

При необходимости демонтажа расходомера, например для проведения периодической поверки на его место вновь устанавливается катушка вплоть до возврата прибора обратно на место эксплуатации.

На рис. 2.4 представлен расходомер переменного перепада давления, принцип действия которого основан на зависимости от расхода вещества перепада давления, создаваемого неподвижным устройством, устанавливаемым в технологическом трубопроводе. Элементом, на котором формируется перепад давления является ОНТ (усовершенствованная трубка Пито). ОНТ создает перепад давления за счет перекрытия сечения

измерительного трубопровода (ИТ) и действует как преграда движению вещества в трубопроводе.

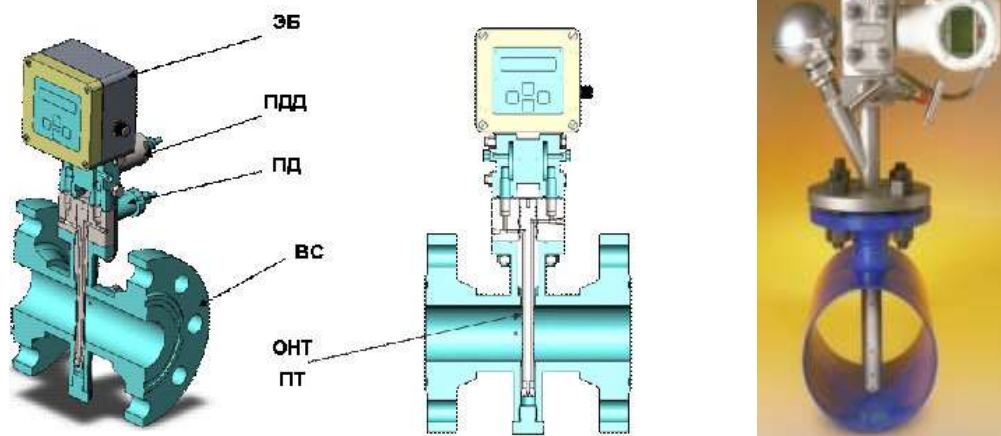


Рис. 2.4. Расходомер переменного перепада давлений с трубкой Пито

Расходомер содержит в своём составе калиброванный участок трубопровода – врезную секцию (ВС), электронный блок (ЭБ), оборудованный клавиатурой и жидкокристаллическим дисплеем, платиновый термопреобразователь температуры (ПТ), преобразователи перепада давления (ПДД), и абсолютного давления (ПД).

Скорость среды уменьшается до нулевого значения по достижении передней по потоку поверхности ОНТ, создавая перед ОНТ зону повышенного давления. Статическое давление в трубопроводе в этой зоне увеличивается на величину давления напора. ОНТ принимает это давление через несколько фронтальных отверстий отбора, за которыми расположена камера высокого давления («плюсовая» камера ОНТ). «Плюсовая» камера соединена непосредственно с ПДД. Десять отверстий отбора давления ОНТ расположены в центрах равновеликих по площади кольцевых участков в поперечном сечении ИТ. Большое количество отборных отверстий обеспечивает уменьшение влияния на осредненное значение давлений искажений профиля скоростей потока, вызываемое наличием местных сопротивлений на ИТ до и после расходомера, а также снижает риск высоких погрешностей измерения расхода при засорении нескольких из отверстий.

Поплавковый расходомер с дисковым или дисково-цилиндрическим поплавком состоит из следующих основных элементов: конического седла, поплавка, демпфера, корпуса прибора и пишущего или указывающего

устройства. *Поплавковые расходомеры* часто имеют демпферное устройство. Обычно это поршень, связанный штоком с поплавком и движущийся в цилиндре, заполненном конденсатом. *Поплавковые расходомеры* с коническим поплавком, в отличие от ротаметров, не имеют конической трубки или конического седла. Изменение площади кольцевого отверстия для прохода потока достигается здесь за счет конической формы самого поплавка, перемещающегося в круглом отверстии, образованном в седле дискового типа.

Дифманометры колокольные. Чувствительным элементом колокольного дифманометра является колокол, помещенный в сосуд, заполненный затворной жидкостью (обычно трансформаторным маслом). Большое давление подводится в пространство под колоколом, меньшее — в пространство над колоколом. Под действием измеряемой разности давлений колокол выходит из состояния равновесия и перемещается до тех пор, пока сумма выталкивающей силы и разности давлений на дно колокола, умноженной на его площадь, не станет равной весу колокола. Высота перемещения колокола пропорциональна измеряемой разности давлений и служит ее мерой, а следовательно, и мерой расхода. Основным достоинством колокольных дифманометров является высокая чувствительность, что определило их широкое применение для измерения расходов газа, находящегося при малом статическом давлении.

Принцип работы ***мембранного счетчика*** (Рис. 2.5) основан на перемещении подвижных перегородок (мембран) камер при поступлении газа в счетчик. Впуск и выпуск газа, расход которого необходимо измерить, вызывает переменное перемещение мембран и через систему рычагов и редуктор приводит в действие счетный механизм. Мембранные счетчики отличаются большим диапазоном измерения до 1:100, но рассчитаны для работы при низком давлении газа, как правило не более 0,5 кгс/см². Мембранные счетчики в основном предназначены для измерения расхода газа в домах, коттеджах. Мембранные счетчики работают бесшумно, они не требуют смазки во время эксплуатации. Однако при больших расходах более 25 м³/ч размеры счетчиков становятся довольно большими.

Сильфонные дифманометры. Чувствительным элементом этих дифманометров является размещаемый в измерительной коробке прибора тонкостенный гофрированный стакан (сильфон) и упирающаяся в него винтовая пружина. Большое давление подводится в пространство, окружающее сильфон, меньшее — внутрь сильфона. Под действием измеряемой разности давлений сильфон сжимается, величина деформации сильфона служит мерой разности давлений, а следовательно, и расхода.

Характеристика сиффона (зависимость хода от усилия) линейна в значительном диапазоне воздействующих на него усилий. Как мембранные, так и сиффонные дифманометры характерны тем, что величина деформации, служащая мерой расхода, не зависит от удельного веса вещества, заполняющего пространства снаружи и внутри чувствительных элементов.



Рис. 2.5. Мембранный счетчик

Расходомеры переменного перепада давления получили широкое распространение как в промышленных, так и в экспериментальных измерениях благодаря присущим данному способу измерения **достоинствам**, к которым следует отнести:

- а) сравнительно высокую точность измерения;
- б) удобство и универсальность метода;
- в) возможность, измерения любых расходов (при некоторых ограничениях) жидкости, пара и газа, находящихся при различных температурах и давлениях;
- г) легкость серийного изготовления приборов.

К недостаткам данного метода измерения следует отнести:

- а) некоторую потерю энергии потока;
- б) относительную трудность промышленного применения при малых расходах вещества, в пульсирующих потоках и потоках вещества, содержащего инородные примеси, а также потоках вещества, находящегося при параметрах, близких к равновесным.

2.2. РАСХОДОМЕРЫ ПОСТОЯННОГО ПЕРЕПАДА ДАВЛЕНИЯ

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

Принцип действия ротаметров основан на силовом взаимодействии потока и помещенного в него тела. Основными элементами ротаметра (Рис. 2.6), принципиально необходимыми для его работы, являются расширяющаяся кверху (по ходу вертикального потока) коническая трубка 1 и заключенный в нее поплавок 2.

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

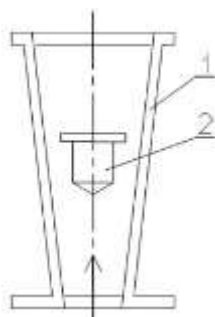


Рис. 2.6. Ротаметр

При появлении потока измеряемой среды, возникающее гидродинамическое давление воздействует на поплавок и вызывает его вертикальное перемещение. При этом (в связи с конусностью трубки) изменяется площадь проходного сечения прибора, образованного диаметром буртика поплавка и внутренней стенкой трубки. Изменение площади происходит практически без изменения перепада давления по обе стороны поплавка.

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

Для использования ротаметров в системах автоматического регулирования или контроля используются дополнительные устройства, преобразующие ход поплавка в пропорциональный механический, электрический или пневматический сигналы.

Схемы различных типов *гидродинамических расходомеров*, отличающихся друг от друга формой тела, воспринимающего гидродинамическое усилие и способом измерения гидродинамического усилия.

Так, для расходомеров с поворотным крылом и поворотным диском мерой расхода является поворот крыла или диска относительно оси вращения. В расходомере с каплевидным телом обтекания мерой расхода является деформация упругой пружины, а следовательно, и осевое перемещение тела обтекания. Иногда и первые два типа гидродинамических расходомеров снабжаются упругими элементами в виде пластинчатых или струнных пружин. Достоинствами гидродинамических расходомеров являются их конструктивная простота, надежность и удобство обслуживания.

Поршневые (золотниковые) расходомеры – третья группа расходомеров постоянного перепада давления, в которых роль поплавка выполняет перемещающийся во втулке поршень. Измеряемое вещество поступает в расходомер, приподнимает поршень и выходит через прорезь или окно во втулке. Поршень поднимается в зависимости от величины расхода вещества, открывая во втулке все большую часть окна. При этом перепад давления на поршне сохраняется постоянным. Можно выбрать форму прорези таким образом, чтобы получить необходимую зависимость между перемещением поршня и расходом измеряемой среды (например, линейную).

Достоинства поршневых расходомеров:

- возможность изменения предела измерения через изменение действующей на поршень массы груза;
- способность измерения среды, имеющей механические примеси.

Однако расходомеры постоянного перепада давления имеют и существенные недостатки, препятствующие их массовому применению: необходимость индивидуальной градуировки на реальных измеряемых средах; существенные потери точности при измерении других сред, отличных от тех, на которых осуществлялась градуировка; непригодность для измерения больших расходов.

2.3. ТАХОМЕТРИЧЕСКИЕ РАСХОДОМЕРЫ

Тахометрическими называются расходомеры и счетчики, имеющие подвижной, обычно вращающийся элемент, скорость движения которого

пропорциональна объемному расходу. Они подразделяются на турбинные, шариковые, роторно-шаровые и камерные.

Измеряя скорость движения подвижного элемента, получаем расходомер, а измеряя общее число оборотов (или ходов) его – счетчик количества (объем или массу) прошедшего вещества. Для создания тахометрического расходомера скорость движения элемента надо предварительно преобразовать в сигнал, пропорциональный расходу и удобный для измерения. В этом случае необходим двухступенчатый преобразователь расхода. Его первая ступень – турбинка, шарик или другой элемент, скорость движения которого пропорциональна объемному расходу, а вторая ступень – тахометрический преобразователь, вырабатывающей измерительный сигнал, обычно частоту электрических импульсов, пропорциональную скорости движения тела. Здесь измерительным прибором будет электрический частотомер: цифровой или аналоговый. Если его дополнить счетчиком электрических импульсов, то получим наряду с измерением расхода также и измерение количества прошедшего вещества.

Существенное достоинство тахометрических расходомеров – быстрое действие, высокая точность и большой диапазон измерения, так, если погрешность турбинных счетчиков воды (ось которых через редуктор связана со счетным механизмом) равна $\pm 2\%$, то у измерителей количества, имеющих тахометрический преобразователь, эта погрешность снижается до $\pm 0,5\%$. Причина в том, что этот преобразователь почти не нагружает ось турбинки в отличие от редуктора и счетного механизма. Погрешность же турбинного расходомера от 0,5 до 1,5 % в зависимости от точности примененного частотомера.

Турбинные тахометрические расходомеры и счетчики количества могут изготавливаться для труб диаметром от 4 до 750 мм, для давлений до 250 МПа и температур от -240 до +700 °С. Турбинные приборы применяются преимущественно для измерения расхода и количества воды, различных нефтепродуктов, других жидкостей и газов.

Основной недостаток турбинных расходомеров – изнашивание опор и поэтому они непригодны для веществ, содержащих механические примеси. Кроме того, с увеличением вязкости вещества линейность передаточной характеристики уменьшается, что исключает их применение для очень вязких веществ. Но смазывающая способность измеряемого вещества желательна для турбинных расходомеров. Это делает их более пригодными для жидкостей, чем для газов. Иногда для измерения расхода в трубах большого диаметра применяют маленькие турбинки, занимающие небольшую часть площади сечения трубы. С помощью реечной штанги они

вводятся в центр или другую точку сечения потока. Погрешность измерения расхода ориентировочно $\pm 5\%$.

Шариковые расходомеры служат для измерения расхода жидкостей, главным образом воды, в трубах диаметром до 150-200 мм. Их важное достоинство – возможность работы на загрязненных средах.

Роторно-шаровые расходомеры появились сравнительно недавно и пока не получили широкого применения.

Камерные приборы как счетчики жидкости и газа наряду с турбинными применяются очень давно. Ранее их называли объемными приборами. Они отличаются большим разнообразием подвижных элементов, дающих наименование разновидностям этих приборов: роторные, поршневые, дисковые, с овальными шестернями, лопастные, винтовые и т. д. По сравнению с турбинными и шариковыми счетчиками количества они могут обеспечить большую точность и больший диапазон измерения. Так, несмотря на связь вала подвижного элемента с редуктором и счетным механизмом погрешность у некоторых из них составляет всего $\pm(0,2-0,5)\%$. Кроме того, камерные счетчики пригодны для измерения количества жидкости практически любой вязкости, в том числе не очень большой. Но они чувствительны к загрязнениям и механическим примесям. В подавляющем большинстве камерные приборы изготавливаются без тахометрических преобразователей и поэтому применяются только для измерения количества, а не расхода.

При необходимости иметь результаты измерения турбинными, шариковыми и камерными приборами в единицах массы их дополняют устройствами, корректирующими показания в зависимости от плотности измеряемого вещества или только от температуры – для жидкостей.

Рассмотрим принцип работы турбинного расходомера.

2.3.1. Турбинный расходомер

В турбинном расходомере используется турбинка, частота вращения которой преобразуется с помощью тахометрического преобразователя в электрический измерительный сигнал. Преобразователь создает тормозящий момент, препятствующий вращению турбинки. Нужно, чтобы этот момент был возможно меньше во избежание вредного влияния на линейность градуировочной зависимости и увеличения зоны нечувствительности. Это требование особенно важно при измерении расхода газа и при малых диаметрах турбинки, когда движущий момент незначителен.

Измерение электрического сигнала низкой частоты затруднительно из-за необходимости применять усилители переменного напряжения, у которых коэффициент усиления резко уменьшается в области низких частот.

Отсюда возникает ограничение на наименьшую частоту измерительного сигнала.

Наиболее часто используются следующие типы преобразователей:

- индуктивные преобразователи;
- индукционные преобразователи;
- фотоэлектрические преобразователи;
- оптические преобразователи.

Турбинный расходомер с индуктивным преобразователем

Индуктивные преобразователи основаны на изменении индуктивности наружной обмотки в зависимости от изменения сопротивления ее магнитной цепи, происходящего при вращении турбинки. Индуктивная катушка с железным сердечником, отделенная от турбинки диаманитной стенкой, питается от особого генератора током сравнительно высокой частоты в несколько килогерц. Во время вращения турбинки при проходе лопастей или других ее элементов из ферромагнитного материала мимо катушки изменяется сопротивление ее магнитной цепи, а значит, и ее индуктивность. Это вызывает периодическое изменение силы тока в обмотке катушки и соответствующее изменение выходного напряжения. При этом на выходе получается высокочастотный сигнал, модулированный по амплитуде. Глубина модуляции постоянна. Демодулятор выделяет из этого сигнала огибающую с постоянной амплитудой, но с переменной частотой, пропорциональной частоте вращения турбинки. Амплитуда сигнала тем больше, чем больше разность сопротивлений магнитной цепи, но тем больше и тормозной момент.

Принципиальная схема турбинного индуктивного расходомера представлена на рис. 2.7. Представляет собой корпус, в кольцевой камере которого перпендикулярно к направлению потока расположена турбинка, являющаяся чувствительным элементом преобразователя.

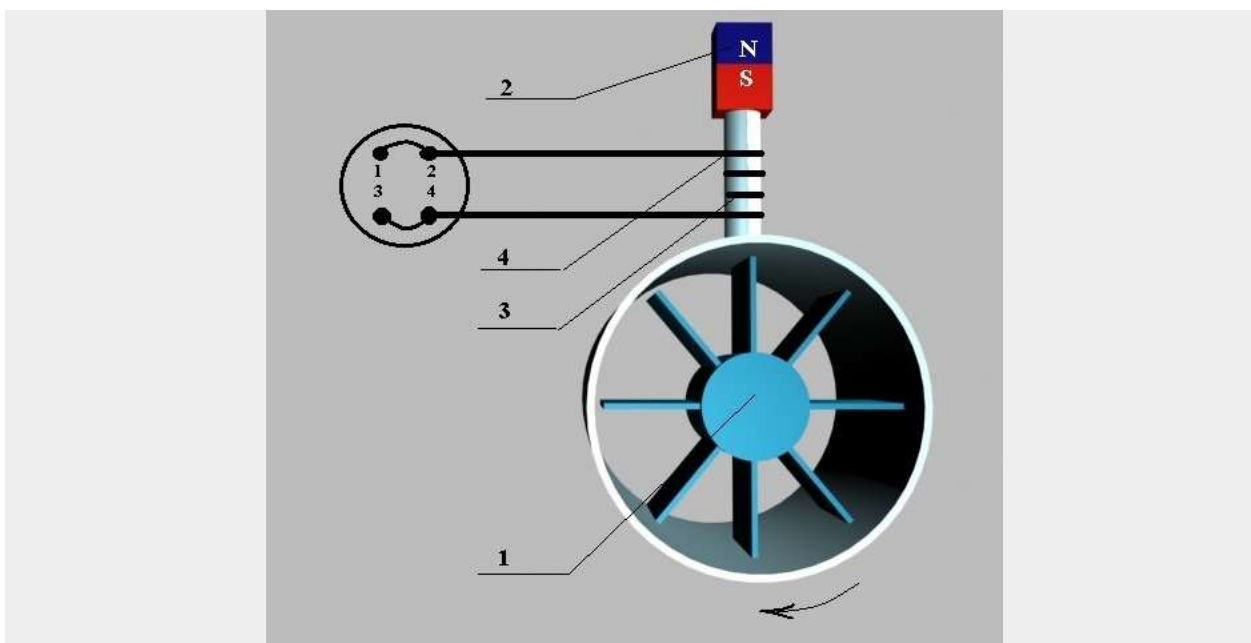


Рис. 2.7. Принципиальная схема турбинного расходомера с индуктивным преобразователем:

1 – турбинка; 2 – магнит; 3 – сердечник; 4 – катушка

Магнитный поток, создаваемый постоянным двухполюсным магнитом 2, замыкается через катушку 4 с сердечником 3, выполненным из электротехнической стали, и магнитопроводящие полости турбинки 1. При вращении турбинки, вследствие периодического изменения зазора между сердечником катушки и лопастями турбинки происходит пульсация магнитного потока, вызывающая наведение ЭДС в катушке магнитоиндукционного генератора. Частота f наведенной ЭДС в обмотках катушки определяется частотой изменения проводимости магнитной цепи

$$f = zn,$$

где: n – число оборотов турбинки, (об/с); z – коэффициент, определяемый числом полных изменений проводимости магнитной цепи за один оборот турбинки (имп/об).

Частота этой ЭДС пропорциональна угловой скорости вращения турбинки и определяет объемный расход жидкости. Градуировочная характеристика преобразователя определяется зависимостью частоты выходного сигнала от проходящего через преобразователь расхода жидкости. В идеальном случае скорость вращения турбинки (частота выходного сигнала) линейно связана с измеряемым расходом, и градуировочная характеристика, выраженная через градуировочный коэффициент « B », имеет вид:

$$f = B \cdot Q,$$

где: Q – измеряемый расход (л/с); f – частота выходного сигнала (Гц); B – градуировочный коэффициент (имп/л).

Турбинный расходомер с индукционным преобразователем

Индукционные (генераторные) преобразователи основаны на создании вращающейся турбинкой пульсирующего тока в обмотке, расположенной с внешней стороны трубы из диаманитного материала, с последующим измерением частоты или ЭДС этого тока. Обмотка, в которой генерируется ток, обычно представляет собой катушку, ось которой перпендикулярна к трубе. Катушка имеет большое число витков тонкой проволоки. Внутри нее помещен железный сердечник из магнитомягкого материала, например, пермаллоя или магнит. В первом случае в ступице турбинки находится магнит. При вращении турбинки поле этого магнита пересекает витки катушки, генерируя в них пульсирующий ток. При необходимости повысить частоту тока увеличивают число катушек, расположенных снаружи, или же число магнитов. Так, в одной из конструкций турбинка снабжена кольцевым ободом, утопленным в кольцевом пазе в стенке корпуса. В ободке помещены с равным шагом несколько десятков маленьких магнитов, каждый из которых, проходя мимо катушки, генерирует импульс тока.

Если же магнит помещен внутри катушки, то тогда или лопатки турбинки изготавливают из ферромагнитного материала, или в ее ступице помещают из аналогичного материала пластинку либо штифт с осью, перпендикулярной к оси трубы. Каждый из этих магнитопроводов при вращении турбинки изменяет поле магнита, находящегося внутри катушки, и генерирует в последней пульсирующий ток. Здесь при большом числе ферромагнитных лопастей легче, чем в предыдущем случае, обеспечить высокую частоту тока при малой частоте вращения, соответствующей малым расходам. Но при небольших диаметрах, когда число лопастей ограничено, для повышения частоты прибегают к увеличению магнитоиндукционных узлов.

Иногда обмотку, в которой генерируется ток вращающимся магнитом, выполняют не в виде прямой катушки, а тороидально, наматывая проволоку на кольцевой сердечник из пермаллоя, отделенный от турбинки диаманитной стенкой. При этом можно увеличить амплитуду сигнала и избавиться от торможения покоя при симметрии магнитной цепи. Тормозящий момент индукционных преобразователей определяется мощностью, расходуемой на выделение тепла в электрическом контуре, и

мощностью, расходуемой на вихревые токи и перемагничивание ферромагнитных материалов. Момент возрастает с ростом амплитуды сигнала. Увеличение последнего оправдано при средних и больших турбинках, когда влияние противодействующего момента, создаваемого тахометрическим преобразователем, незначительно, при этом в некоторых случаях можно обойтись без промежуточных усилителей.

Турбинные расходомеры с фотоэлектрическими преобразователями

Фотоэлектрические тахометрические преобразователи основаны на появлении пульсирующего электрического напряжения в цепи фотоэлемента в результате периодического прерывания вращающейся турбинкой луча света, падающего на фотоэлемент. Частота пульсации напряжения в цепи фотоэлемента пропорциональна вращению турбинки. Такие преобразователи не создают никакого тормозящего момента, но устройство их сложнее, чем индукционных или индуктивных. Они применяются главным образом при измерении расхода газа, но иногда и жидкости, например, при небольших диаметрах турбинки или при измерении быстропеременных расходов. Обычно осветитель (электрическая лампочка) и фотоэлемент устанавливаются с разных сторон турбинки и отделяются от измеряемого вещества прочными стеклами. В теле турбинки делается одно или несколько отверстий, которые при вращении турбинки создают периодическое освещение фотоэлемента светом, падающим от осветителя. Для получения высокой частоты фототока служат разные средства. Для этой цели применено зубчатое колесо, каждый зуб которого модулирует луч света, падающий на фотоэлемент. В другом расходомере применены три фотоэлектрических преобразователя, каждый из которых состоит из лампы, фотосопротивления и двух оптических призм, отделяющих фотосопротивления и лампы от жидкости. Фотосопротивления смещены относительно друг друга на 120° .

Применение фотоэлектрических преобразователей для непрозрачных жидкостей затруднительно, но возможно. Тангенциальная турбинка имеет отражательные пластинки на концах лопастей. Над турбинкой, ось которой горизонтальна, помещено прочное стекло, за которым расположены осветитель и германиевый фотодиод. При вертикальном положении лопасти турбинки луч света отражается от пластинки на конце лопасти и освещает фотодиод. Слой жидкости между концом лопасти и стеклом очень тонкий и не мешает процессу отражения. Кроме того, максимум чувствительности германиевого фотодиода лежит в инфракрасной области при длине волны около 1,5 мк. Известны также конструкции, в которых для измерения

непрозрачной жидкости на вертикальной оси турбинки, выведенной вверх в воздушную камеру, укреплялся obtюраторный диск для прерывания луча света.

Турбинные расходомеры с оптическими преобразователями

Оптические тахометрические преобразователи, как и фотоэлектрические, основаны на периодическом прерывании лопастями турбинки светового луча. От источника инфракрасного излучения (светодиод), находящегося в приемно-передающем блоке световой поток вводится в центральный световод пучка из семи кварц-полимерных световодов диаметром 0,4 мм, образующих волоконно-оптическую линию связи, и далее через гермоввод падает на торец очередной лопасти турбинки. Отражаясь от нее, световой поток через гермоввод попадает на торцы шести периферийных световодов волоконно-оптической линии связи и затем на светочувствительный элемент блока. В качестве гермоввода применяется графан-стержень из кварца с градиентным распределением по радиусу коэффициента преломления, который имеет свойства цилиндрической линзы.

В реальных условиях на турбинку оказывают тормозящие воздействия силы трения жидкости и т.п. Это приводит к тому, что вращение турбинки начинается только при таком расходе, когда вращающий момент на турбинке становится больше сил сопротивления и поэтому реальная характеристика имеет зону чувствительности и через начало координат не проходит. Для рабочих жидкостей с вязкостью до 1,5 мм²/с, когда силы трения жидкости имеют еще сравнительно небольшие величины, индивидуальная градуировочная характеристика преобразователя выражается из предыдущей формулы и имеет вид:

$$Q = f/V \text{ или } Q = a + f/V.$$

Градуировку турбинного расходомера необходимо проводить на измеряемой жидкости, иначе на результат измерения будет сильно сказываться изменение кинематической вязкости измеряемой жидкости.

Турбинные преобразователи расхода могут быть с аксиальной и с тангенциальной турбинкой (рис. 2.8.). У первых лопасти расположены по винтовой линии, а ось совпадает с осью потока.

У вторых ось перпендикулярна к направлению потока, а прямые лопасти расположены радиально по отношению к оси. Аксиальные турбинки встречаются чаще, чем тангенциальные. Последние применяют лишь при небольших диаметрах труб, обычно до 50 мм.

Имеются разновидности турбинного расходомера – скоростные счетчики. Эти счетчики аналогичны по устройству турбинным расходомерам. Разница между ними заключается в том, что в расходомерах измеряется скорость вращения турбинки, а в счетчиках – число ее оборотов, которое затем пересчитывается на количество жидкости, прошедшее через счетчик за интересующий нас интервал времени, например, за месяц.

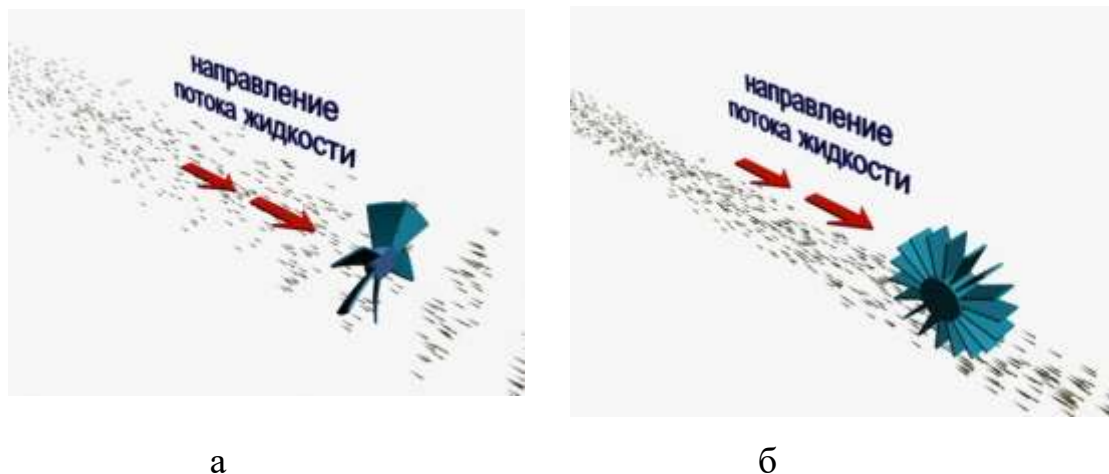


Рис. 2.8. Виды турбинок:
а – аксиальная; б – тангениальная

Внешний вид турбинных расходомеров представлен на рис. 2.9.

Применение: горюче-смазочные материалы, жидкое топливо, мазут, спирты, охлаждающие жидкости, вода, фармацевтические, химические и криогенные жидкости, жидкие газы.

Имеют хорошее соотношение цены и качества.

При эксплуатации турбинных преобразователей расхода необходимо учитывать, что аксиальные турбинки весьма чувствительны к направлению движения потока, поэтому в большинстве случаев на входе, а иногда и на выходе в их конструкции предусматриваются неподвижные лопатки, направляющие поток параллельно оси трубы. Изменением угла наклона хотя бы одной из этих лопаток можно воздействовать на частоту вращения турбинки. Несмотря на присутствие струевыпрямителей, турбинные расходомеры нельзя устанавливать рядом с местными сопротивлениями.



Рис. 2.9. Турбинные расходомеры жидкости

Наибольшее влияние на показания ряда турбинных преобразователей расхода оказывают местные сопротивления, создающие сильное одностороннее пережатие потока, а также сопротивления, вызывающие винтовое движение. Тем не менее, прямой участок трубы между местным сопротивлением и турбинным преобразователем, равный всего 10 диаметрам трубопровода, в большинстве случаев оказывается достаточным для снижения влияния местного сопротивления до пренебрежимо малого значения. Применение мелкоячеистых сеток и других типов турбулизаторов на входе перед турбинным преобразователем оказывается также весьма эффективным для устранения деформаций потока, вызываемых местными сопротивлениями.

Изменение пространственной ориентации (вертикальная или горизонтальная установка) изменяет условия работы подшипников и поэтому может оказать влияние на градуировочную зависимость, особенно при малых расходах. Однако, большинство конструкций турбинных расходомеров малочувствительны к изменению пространственной ориентации. Большое значение для обеспечения не только стабильности статической характеристики преобразователя расхода, но и длительного срока его службы имеет надежная работа опор. Условия их работы весьма тяжелые – высокая

частота вращения турбинок, доходящая до нескольких сотен оборотов в секунду, и отсутствие в большинстве случаев подачи смазочного материала к подшипникам. Поэтому смазывающая способность измеряемого вещества весьма желательна. Но у сухих газов и кислот она полностью отсутствует. Изменение смазывающей способности измеряемой жидкости может оказывать влияние на характеристику расходомера.

Механические примеси нежелательны, так как при их наличии подшипники турбинных расходомеров быстро выходят из строя. Если момент трения в подшипниках составляет небольшую часть от общего момента сопротивления, то замену износившихся подшипников можно делать даже без переградуировки расходомера. Но если момент трения существен, то постепенное изнашивание подшипников будет влиять на показания. В этих случаях необходимо проводить периодическую проверку градуировки расходомера.

Изменение температуры и давления, сопровождающееся изменением плотности и вязкости измеряемого вещества, будет влиять на градуировочную характеристику, главным образом у газов. Так, изменение плотности вызывает изменение движущегося момента и сказывается на показаниях расходомера. С уменьшением плотности уменьшается частота вращения турбинки и возрастает порог чувствительности, приблизительно обратно пропорционально квадратному корню из отношения плотностей.

В процессе эксплуатации оси турбинных расходомеров изнашиваются, особенно на газе, в связи с чем, некоторые изготовители ограничивают их срок службы семью годами. Но имеются данные, свидетельствующие о возможности более длительной работы турбинных расходомеров.

Вертикальная или горизонтальная установка изменяет условия работы подшипников, и это может влиять на градуировку, особенно при малых расходах, но в большинстве конструкций крыльчатые расходомеры малочувствительны к изменению пространственной ориентации.

2.3.2. Шариковые расходомеры

Шариковые расходомеры применяют для измерения расхода жидкостей с твердыми частицами и агрессивных, а также теплоносителя. Их применение обусловлено многочисленными преимуществами:

- нечувствительность к механическим частичкам в измеряемой жидкости при их концентрации до 40 г/л и размерами до 2 мм;
- допустимость вибраций и ударных нагрузок;
- измерение пульсирующих потоков с частотой пульсаций до 5 рад/с и амплитудой, которая изменяется от нуля вплоть до верхнего предела измерений;

- возможность измерения сверхмалых расходов;
- возможность изготовления всех деталей прибора, которые находятся в контакте с измеряемой жидкостью, из полимерных материалов, что делает возможным измерение агрессивных сред;
- высокая надежность и большой технический ресурс работы;
- бесконтактный съем сигнала с первичного преобразователя.

Благодаря данным преимуществам они нашли свое применение в системах контроля различных технологических процессов на АЭС, в химической и фармацевтической промышленности, при измерении многофазных сред, сверхмалых расходов.

Принцип действия шариковых расходомеров базируется на передаче скорости движения жидкости свободно плавающему телу (при этом в измерительной среде отсутствуют опоры). В качестве свободно плавающего тела используется шарик. Это объясняется тем, что для обеспечения постоянного силового воздействия со стороны потока на тело, а значит и равномерного его вращения при неизменной скорости измеряемого потока необходимо, чтобы площадь проекции этого тела на плоскость, перпендикулярную вектору скорости потока, была постоянной. Именно такое условие выполняется для тела в форме шарика. При плотности материала шарика, близкой к плотности измеряемой жидкости, можно считать, что шарик движется со скоростью жидкости.

Угловая скорость вращения шарика прямо пропорциональна скорости протекания жидкости через прибор, и, следовательно, пропорциональна измеряемому расходу.

Существующие конструкции шариковых расходомеров можно разделить на два типа по способу создания угловой составляющей скорости потока в рабочей камере:

- с осевым подводом потока;
- с тангенциальным подводом потока.

В случае осевого подвода потока угловая составляющая скорости потока создается лопастями неподвижного струенаправляющего аппарата. Подвод и отвод потока осуществляется по оси рабочей камеры.

Шариковый тахометрический расходомер с осевым подводом потока представлен на рис. 2.10. На пути потока жидкости размещается струенаправляющий аппарат 1, с помощью которого жидкость движется по винтовой линии вокруг оси трубопровода. Далее находится свободно плавающее тело – шарик 3, движению которого далее в осевом направлении препятствует ограничительное кольцо 4. Шарик под действием силы гидродинамического давления будет вращаться в плоскости,

перпендикулярной оси трубопровода. На корпусе прибора 5 в зоне вращения шарика находится устройство для съема сигнала 2.

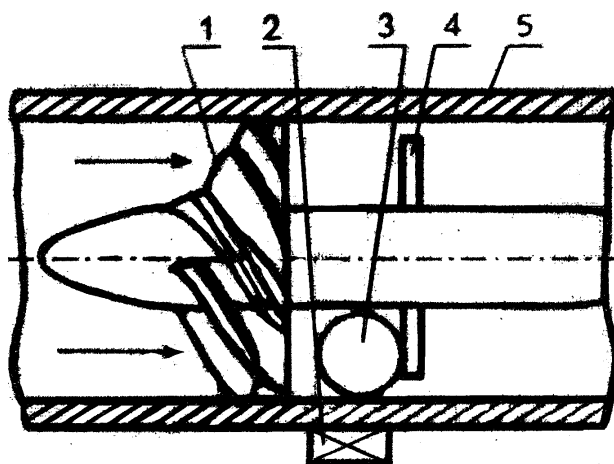


Рис. 2.10. Шариковый расходомер с осевым подводом потока:
1 – струенаправляющий аппарат; 2 – устройство для съема сигнала;
3 – шарик; 4 – ограничительное кольцо; 5 – корпус

Поток измеряемой жидкости после попадания в корпус прибора начинает двигаться по винтовой линии. В результате взаимодействия жидкости и шарика последний начинает двигаться со скоростью, пропорциональной расходу жидкости. Частота вращения шарика, который изготовлен с ферромагнитной вставкой, фиксируется вторичным преобразователем – устройством для съема сигнала.

Шариковый тахометрический расходомер с тангенциальным подводом потока (рис. 2.11) состоит из цилиндрического корпуса с двумя расположенными в одной плоскости и противоположно направленными тангенциальными патрубками 1 и 5. Внутри корпуса измеряемая жидкость, перемещаясь к выходному патрубку, приобретает характер воронки. Этот воронкообразный поток жидкости проходит между ограничительными кольцами 4, закрепленными на ступице 3, и приводит шарик 2 во вращение. На корпусе также предусмотрено устройство для бесконтактного съема сигнала 6.

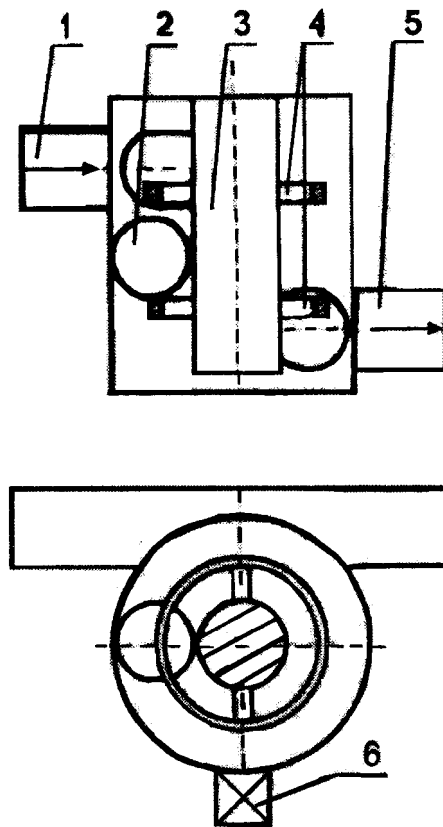


Рис. 2.11. Шариковый расходомер с тангенциальным подводом жидкости:
 1, 5 – тангенциальные патрубки; 2 – шарик; 3 – ступица; 4 - ограничительные кольца; 6 – устройство для бесконтактного съема сигнала

Шариковый расходомер с тангенциальной подачей жидкости, по сравнению с осевой подачей потока, имеют ряд недостатков: большие нагрузки на ограничительные кольца, нелинейная градуировочная характеристика (поэтому эти приборы наиболее часто используются в качестве расходомеров); большие габариты из-за необходимости разнесения входного и выходного патрубков. Но для измерения больших расходов рационально использовать тангенциальную подачу, так как при измерении больших расходов необходимо, чтобы отношение площади поперечного сечения рабочей камеры к площади сечения шарика было порядка 50-70. Это отношение определяет часть потока, которая при прохождении через рабочую камеру действует на чувствительный элемент (шарик), а значит, и чувствительность прибора. При измерениях малых расходов, когда кинетическая энергия потока мала, необходимо чтобы это отношение было близким к 1.

2.3.3. Роторно-шаровые расходомеры

У роторно-шаровых расходомеров шар или другое тело вращения движется не по кругу, а вращается вокруг своей оси под воздействием потока измеряемого вещества. Иногда эти приборы называют расходомерами с левитирующим шаром или расходомерами с гидродинамической подвеской ротора. Имеется несколько их разновидностей, отличающихся друг от друга, в частности, способом приведения шара во вращение.

В корпусе 1 преобразователя расхода одного из таких расходомеров (рис. 2.12) запрессована втулка 3, внутри которой находится шар 4. Шар имеет канавку 6 на горизонтальной окружности и, кроме того, для обеспечения надлежащей своей ориентации в пространстве воздушную полость, в верхней части закрываемую пробкой 7. Втулка закрыта сверху крышкой 2, а снизу крышкой, в которой расположены две индукционные катушки тахометрического преобразователя 8.

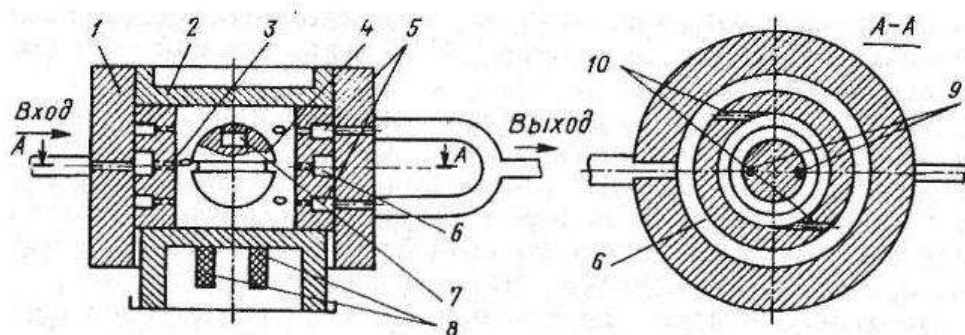


Рис. 2.12. Преобразователь расхода расходомера с шаровым ротором

Жидкость через отверстие в корпусе входит в кольцевой коллектор, откуда через два тангенциальных отверстия 10 диаметром 0,4 мм поступает в камеру, где расположен шар, и вызывает его вращение. При этом гидродинамические силы способствуют такому расположению шара по высоте, при котором его канавка оказывается в зоне действия струй, вытекающих из отверстий. Вращение шара с помощью двух находящихся в нем магнитных стержней и индукционных катушек преобразуется в модулированный электрический сигнал. Жидкость удаляется через два кольцевых коллектора 5 в выходную трубу. Приведенная погрешность $\pm 1\%$. Допустимы механические примеси в жидкости при размере частиц не более 0,04мм (0,1 от диаметра тангенциальных отверстий). Градуировочная характеристика расходомера достаточно линейна.

Принципиальная схема другой разновидности преобразователя расходомера с шаром, вращающимся вокруг своей оси, приведена на рис. 2.13. В основе его работы лежит следующее явление. Шар 3, помещенный в полости 2 определенной геометрической формы, в которую

жидкость поступает через входное отверстие 1 и уходит через выходное отверстие 6, будет взвешиваться потоком и занимать определенное положение, начиная с некоторого значения расхода. Если такой шар снабдить сквозным диаметральной отверстием, то он будет вращаться со скоростью, пропорциональной объемному расходу жидкости, вокруг оси, перпендикулярной к оси потока. Для передачи частоты вращения шара в него запрессовывается магнитная вставка, а снаружи диамагнитного корпуса преобразователя помещается индукционный узел съема сигнала.

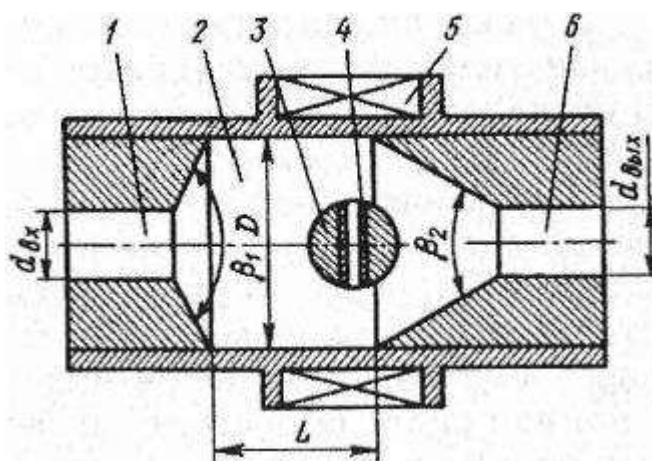


Рис. 2.13. Схема преобразователя расхода с взвешенным шаром

2.3.4. Камерные расходомеры

Камерными называются тахометрические расходомеры и счетчики, подвижные элементы которых приходят в движение (непрерывное или периодическое) под давлением измеряемой жидкости или газа и при этом отмеривают определенные объемы или массы измеряемого вещества. Камерные расходомеры измеряют объемный расход напрямую путем повторяющегося захвата порции жидкости. Общий объем жидкости, проходящей через расходомер в заданный промежуток времени, – это произведение объема порции на количество порций.

Камерные расходомеры часто суммируют расход напрямую на встроенный счетчик, но они также могут генерировать импульсный выход, который может быть передан на систему управления. Так как каждый импульс представляет дискретный объем жидкости, они хорошо подходят для автоматического дозирования и учета.

Данный тип расходомеров имеет ряд преимуществ:

- **высокий класс точности;**
- невысокая стоимость;
- возможность измерения малых расходов;

- широкий диапазон измерения;
- возможность измерения **расходов жидкостей** с относительно высокой вязкостью.

Недостатки камерных измерителей расхода:

- наличие движущихся частей. Износ движущихся механизмов приводит к снижению точности измерений или к возможному выходу из строя **расходомера**;
- относительно сложное конструктивное исполнение;
- высокая чувствительность к механическим примесям;
- не применяют для измерения расхода в трубах с большим диаметром;
- сложность ремонта. Обычно ремонт камерных **расходомеров** возможен только в заводских условиях.

Камерные счетчики имеют большое число различных разновидностей.

Их можно разделить на три основных группы:

- с эластичными стенками камер;
- без движущихся разделительных элементов (Рис. 2.14);
- с движущимися разделительными элементами.

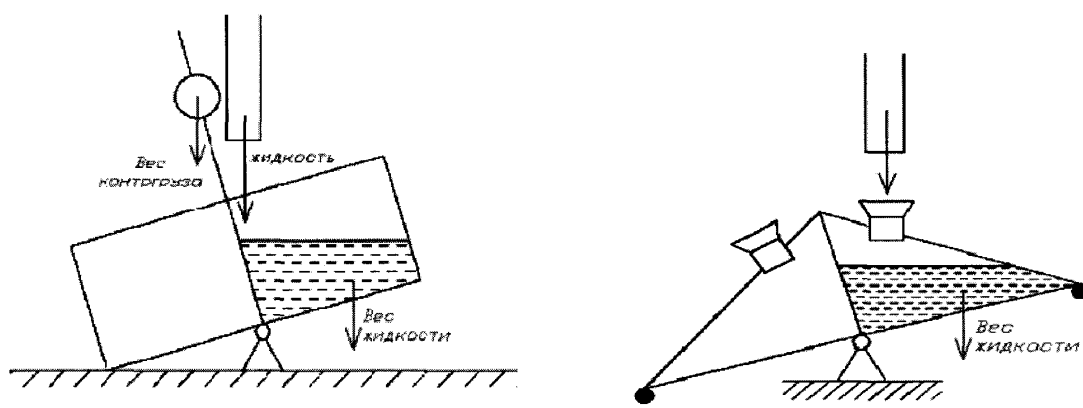
Снижение точности камерных **расходомеров** связано с просачиванием через внутреннюю изолированную поверхность. Для того чтобы повысить **точность измерения расхода** и количества в существующие конструкции приборов добавляют тахометрический преобразователь.

Наиболее известный прибор первой группы – газосчетчик с эластичными стенками двух или более мерных камер, которые последовательно заполняются и опустошаются при их постоянном возвратно-поступательном движении. Газораспределительный механизм золотниковый или клапанный. Приборы этой группы находят широкое применение при измерении газа, расходуемого мелкими потребителями.

Приборы второй группы состоят из одной или нескольких мерных камер, которые последовательно опорожняются и заполняются.

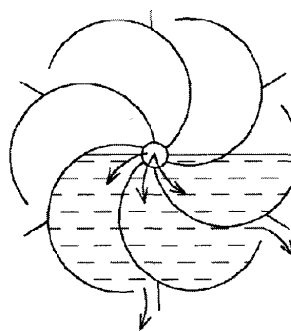
К ним относятся:

- вращающиеся барабанные (измеряют объем жидкости или газа);
- опрокидывающиеся (измеряют массу или объем жидкости);
- приборы с колеблющимся колоколом.



а

б



в

г

Рис. 2.14. Камерные преобразователи расхода без движущихся разделительных элементов:

а – опрокидывающийся гравиметрический, б – опрокидывающийся объемный, в – барабанный для газа, г – барабанный для жидкости

Кроме того, к этой же группе камерных счетчиков могут быть условно отнесены мерные емкости с сильфонным или клапанным опорожнением. Счетчики без движущегося разделительного элемента считаются самыми точными. Но они служат только для измерения небольших расходов и лишь при ограниченном давлении измеряемого вещества.

Чаще всего применяют приборы третьей группы. Стоит отметить, что они имеют наибольшее число разновидностей. Камерные **расходомеры** с движущимися разделительными элементами состоят из жесткой камеры, в которой непрерывно перемещается один или нескольких разделительных элементов (поршня, диска, роторов и т.п.) осуществляется отмеривание объемов жидкости или газа.

Перечислим их основные разновидности.

Роторные счетчики отличаются друг от друга формой и числом роторов. Они могут быть одинаковыми, например, восьмеркообразными, трапецеидальными и т.д.

Наибольшее распространение нашли в качестве в качестве счетчиков газа.

Камерные счетчики газа роторного типа с роторами восьмеричной формы (Рис. 2.15) изготавливаются серийно. На концах осей роторов с обеих сторон имеются соединительные шестерни, применяемые для синхронизации вращения роторов, которое происходит под действием разности давлений газа на входе и выходе.

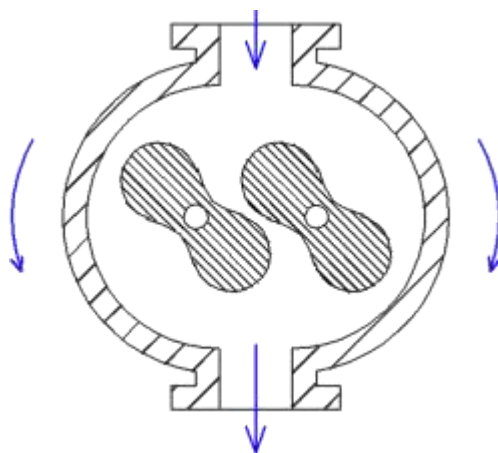


Рис. 2.15. Роторный счетчик

В положении а левый ротор замыкает в измерительной камере порцию газа, которую затем будет перемещать в выходной патрубок. В этом положении движущий момент приложен только к левому ротору. При дальнейшем вращении роторов движущий момент появляется и на правом роторе. Этот момент будет возрастать, пока движущий момент на левом роторе, который начинает постепенно уменьшаться, не станет равным нулю после угла поворота 90° в положении б. При этом правый ротор замкнет вторую порцию газа. Всего за один оборот роторов счетчик перемещает четыре таких объема.

Также применяют газосчетчики с роторами трапецеидальной формы и трехроторные счетчики газа, роторами которого являются вращающиеся лопасти. Измерительный объем данного счетчика выше, чем у газосчетчиков с восьмеричными или трапецеидальными роторами при одном и том же размере внутреннего пространства, что объясняется меньшим заполнением последнего движущимися элементами.

Поршневые счетчики могут быть однопоршневыми и многопоршневыми с коленчатым валом или распределительным диском. Они отличаются высокой точностью и применяются главным образом для измерения расхода нефтепродуктов.

Поршневые расходомеры – измерители прямого объема (иногда говорят: вытесненного объема). Функционирование таких приборов основано на том, что определенная часть от объема потока постоянно направляется в измерительную камеру (которая постоянно наполняется и опустошается). Внутри этой камеры движется поршень.

Поршень подобного типа тахометрического расходомера приводится в движение разностью давлений между впускным и выпускными отверстиями счетчика, которая преобразовывается во вращательное движение и передается на магнит и датчик магнитного поля.

Подвижным элементом *кольцевого счетчика* является кольцо 8 (Рис. 2.16), находящееся внутри измерительной камеры 2. Кольцо катится по внутренней поверхности камеры 2 под давлением жидкости, которая поступает через отверстие 6. Кольцо одновременно скользит вдоль перегородки 5, вытесняя жидкость из измерительной камеры через выходное отверстие 4. При этом ось 7 кольца движется по часовой стрелке вокруг оси 3 внутри цилиндра.

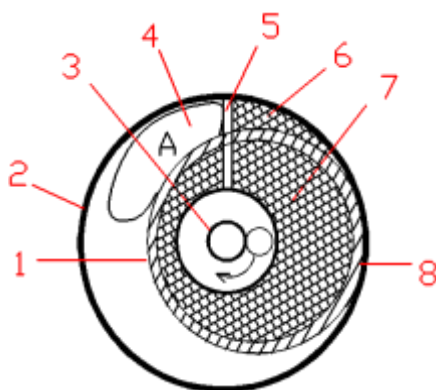


Рис. 2.16. Схема кольцевого счетчика жидкости

Ось 7 поворачивается на 180° , после чего внутри кольца окажется замкнутым определенный объем жидкости. Снаружи кольца поступает жидкость, под давлением которой оно продолжает свое движение и вытесняет замкнутую в нем жидкость через отверстие 4.

С помощью фиксированного магнита и датчика Холла возможно генерировать измерительный цифровой сигнал для обработки.

Главным достоинством кольцевого счетчика является простота его устройства, прежде всего движущегося элемента – кольца. Это упрощает и облегчает разборку и очистку счетчика. Вследствие чего кольцевые счетчики широко применяют при измерении расхода различных жидких пищевых продуктов, т. е. там, где требуется частая разборка и чистка. Кольцо может изготавливаться из графита, бронзы, легких металлов и других материалов, в

зависимости от рода измеряемого вещества. Но кольцевые счетчики создают небольшую неравномерность движения жидкости в пределах каждого цикла, что является их недостатком. Погрешность счетчика уменьшается с увеличением вязкости жидкости и сокращением диапазона измерения. Для узкого диапазона измерения погрешность может быть доведена до $\pm 0,1\%$.

Внешний вид поршневого кольцевого счетчика показан на рис. 2.17.



Рис. 2.17. Кольцевой расходомер DRZ

Зубчатые счетчики имеют две отличные друг от друга разновидности: счетчики с овальными шестернями, счетчики винтовые, состоящие из двух-трех роторов винтовой формы. Те и другие предназначены для измерения жидкостей, причем винтовые лишь при весьма малых расходах.

Основное применение имеют счетчики с овальными шестернями для измерения жидкости самой различной вязкости, в том числе и очень высокой.

Счетчики жидкости с овальными шестернями

Рассматриваемые счетчики состоят из двух овальных шестерен, который находятся в зацеплении (см. рис. 2.18) и вращаются в противоположные стороны. Под влиянием разности давлений жидкости в подводящей и отводящей трубах и перемещающих при этом определенные ее объемы.

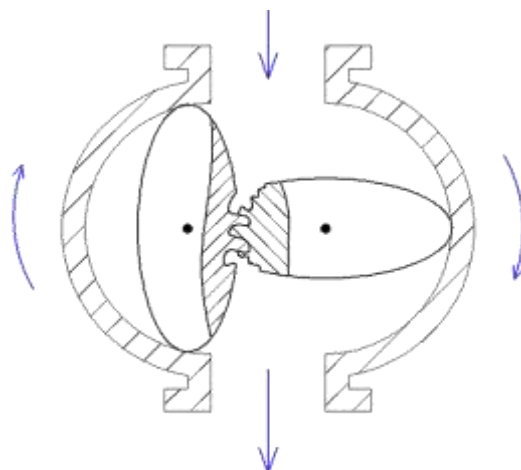


Рис. 2.18. Схема зубчатого счетчика с овальными шестернями

Их применяют для измерения количества жидкостей с давлением до 6,4 МПа, температурой от 40 до +120 °С и давлением до 6,4 МПа в трубах диаметром от 15 до 80 мм. Их габаритные размеры и масса значительно меньше, чем у поршневых счетчиков, благодаря вращательному движению разделительных элементов.

Счетчики классов 0,25 и 0,5 с овальными шестернями широко применяют для измерения различных нефтепродуктов.

Если вязкость у измеряемой жидкости меньше вязкости градуировочной, то надо увеличить показания, чтобы кривая погрешности сместилась в плюсовую область. При большой вязкости поступают наоборот. Если счетчик с овальными шестернями снабдить тахометрическим преобразователем или же тахометром, измеряющим частоту вращения выходного вала редуктора, то тогда наряду с измерением количества прошедшей жидкости будет измеряться и ее расход. При этом необходимо иметь устройство (например, демпфирующее) для сглаживания пульсаций шестерен в пределах каждого их оборота.

Погрешность составляет не более 1 % от измеряемого значения.

Лопастные счетчики жидкости (Рис. 1.19) состоят из цилиндра, вращающегося внутри цилиндрической камеры, и четырех лопастей, перемещающихся в радиальных прорезях последнего. Одна или две из этих лопастей всегда принудительно выдвинуты из цилиндра практически до упора во внутреннюю поверхность камеры, перекрывая при этом кольцевой проход. Лопастей, находясь под разностью давлений жидкости, входящей и уходящей из счетчика, перемещаются вместе с ней, вызывая одновременно вращение цилиндра.



Рис. 2.19. Лопастной счетчик

Могут быть со скользящими или же со складывающимися лопастями. Наибольшее применение имеют первые. Лопастни имеют либо кулачковое управление, либо движутся, упираясь пружинами в стенку камеры.

Принудительное перемещение лопастей в радиальных прорезях наиболее часто осуществляется с помощью профилированного кулачка, режес - под воздействием направляющей кромки внутри измерительной камеры. В первом случае вокруг расположенного в центре неподвижного профилированного кулачка обкатываются четыре ролика, каждый из которых закреплен на своей лопасти. В данном случае лопасти не упираются во внутреннюю поверхность камеры, из-за чего между ними остается небольшой зазор. Для предотвращения непосредственного перетекания жидкости из подводящей трубы в отводящую служит кольцевая вставка.

При втором способе вращающийся цилиндр размещен эксцентрично относительно измерительной камеры. Лопастни в данном случае под воздействием пружин или же благодаря механической связи противоположных лопастей принудительно прижимаются к внутренней поверхности камеры, образуя две лопастные пары. Здесь протечки через зазоры сведены до минимума. Но данный способ имеет существенный недостаток: трение лопастей о цилиндрическую поверхность камеры, что приводит к изнашиванию трущихся поверхностей и увеличивает потерю давления. При кулачковом приводе лопастей этих недостатков нет, но необходимо обеспечить малые (около 0,05 мм) зазоры, для чего кулачковый механизм, лопасти и внутреннюю поверхность камеры выполняют с повышенной точностью, что обеспечивает минимальные неконтролируемые утечки жидкости в счетчике, поэтому данным счётчиком преимущественно измеряют количество маловязких жидкостей (легких нефтепродуктов, спирта и т. п.).

Лопастные расходомеры предназначены для измерения жидкости в трубах диаметром 100-200 мм. Используются для измерения маловязких и средневязких жидкостей. Используются при измерении расходов на испытательных стендах, в гидроприводах станков и технологического оборудования, на стационарных и передвижных бензо- и маслозаправочных

станциях, в топливных системах карбюраторных и дизельных двигателей автомобилей, тракторов, строительно-дорожных, сельскохозяйственных, лесозаготовительных машин, тепловозов и судов, как дозаторы при заливке танкеров, железнодорожных цистерн, резервуаров.

Рабочей средой могут быть: нефть и нефтепродукты (минеральные масла, мазут, бензин, керосин, дизельное топливо и др.), вода, жидкие химические вещества, сжиженный газ, кислород, азот, природный газ, фреон и многие другие однофазные жидкости и газы.

Преимущества: обладают высокой точностью, однако потери давления при измерении сред, выше, чем у турбинных **расходомеров**. Точность замеров зависит от скорости потока и вязкости среды. Для лопастных **расходомеров** характерны бесшумность в работе, чувствительность даже к капельным расходам рабочей жидкости, малая инерционность вращающихся частей, долговечность и надежность. Также эти счетчики легко ремонтировать. При необходимости замены комплекта ротора снимают заднюю крышку, вынимают его из корпуса и заменяют новым, не разбирая весь прибор.

При заказе счётчика указывают его тип и диапазон вязкостей измеряемой жидкости.

Ковшовые счетчики жидкости

Ковшевые камерные счетчики состоят из цилиндрического ротора с крестообразным поперечным сечением, на котором укреплены оси четырех полуцилиндрических ковшей. Под влиянием разности давлений на ковши, находящиеся у входа и выхода жидкости, ротор вращается. При этом ковши поворачиваются вокруг своих осей, но так, что их наклон к горизонтальной оси счетчика остается неизменным.

На концах ротора имеются две дисковые пластины с укрепленными на них четырьмя подшипниками. Внутри этих подшипников вращаются оси ковшей. Для прохода жидкости имеется кольцевой канал, расположенный между измерительной камерой и ротором. Внизу данного канала имеется вставка, препятствующая непосредственному перетоку жидкости из входного отверстия в выходное.

Принцип действия: движение ковшей и вращение ротора вызывается разностью давлений жидкости на входе и выходе. При этом ковши движутся плоскопараллельно, не меняя наклона относительно оси ротора. Такое движение обеспечивается с помощью четырех шестерен, укрепленных на осях ковшей и связанных четырьмя промежуточными шестернями с центральной неподвижной шестерней.

Но применяется и другой способ, заключающийся в применении особого четырехзвенного механизма, который состоит из диска, несущего четыре пальца, связанного кривошипами с ковшами. Диск расположен эксцентрично на передней промежуточной крышке и может вращаться вокруг своей оси. Геометрические оси ротора, диска, ковша и кривошипа – вершины четырехзвенного механизма. В результате при полном повороте ротора по часовой стрелке ковши также совершают полный поворот вокруг своих осей, но уже против часовой стрелки.

Достоинства ковшовых счётчиков:

1. большой измерительный объем, благодаря чему они удобны для измерения сравнительно больших расходов жидкости в трубах диаметром 200 – 400 мм. За полный оборот ротора через счетчик перемещается жидкость, не только находящаяся в кольцевом канале, но также и заполняющая полукруглые пазы в роторе. Поэтому измерительный объем счетчика равен всей площади измерительной камеры за вычетом крестообразной площади поперечного сечения ротора, а также площади поперечного сечения стенок ковшей;
2. большой диапазон измерения: $Q_{\max}/Q_{\min} = 10$;
3. малая погрешность в пределах диапазона измерения: $\pm 0,5$ % от измеряемой величины.

Основной недостаток данных счетчиков – конструктивная сложность. У ковшовых сопротивление движению разделительных элементов возрастает с увеличением вязкости жидкости, как и у других счетчиков камерного типа, что приводит к соответствующему снижению предельно допустимых расходов. Потеря давления в большинстве случаев не превосходит 30 кПа (при очень большой вязкости не свыше 50 кПа).

У *дисковых счетчиков* диск с шаровой пятой совершает сложное колебательное движение между конусообразными поверхностями камеры.

Камерные подвижные счетчики

Все камерные подвижные счетчики можно разделить на опрокидывающиеся и барабанные.

Опрокидывающиеся счетчики. Применяются только для жидкости. Они состоят из двух камер или ковшей, опрокидывание которых происходит после заполнения одной из камер определенным объемом или определенной массой жидкости в случае грузового уравнивания. Первые опрокидываются после начала перетекания жидкости в дополнительный желобок, прикрепленный к наружному краю камеры. Чтобы избежать разбрызгивания жидкости или преждевременного попадания в желобки она

поступает через воронки, концы которых опущены почти до дна камер. Объем камер от 0,5 до 50 л, интервалы между опрокидываниями 10-30 с. Опрокидывающиеся счетчики удобны для измерения различных жидкостей при малых расходах в очень широком диапазоне. Погрешность не более 2 % от измеряемой величины и зависит главным образом от неучитываемого количества тх жидкости, поступающей в камеру в момент ее опрокидывания, и в меньшей степени – от изменения момента трения в опорах.

Для уменьшения погрешности следует в момент, когда наполнение очередной камеры заканчивается, автоматически снижать расход поступающей жидкости по аналогии с тем, как это делается у ковшевых весов. Тогда погрешность можно снизить до 0,1 %, как, например, в водосчетчиках, опорожнявшихся с помощью сифонов. Но при этом устройство счетчика существенно усложнится.

Опрокидывающиеся счетчики пригодны для измерения расходов при повышенном давлении, но при условии, что они помещены в прочный и герметичный корпус, внутрь которого подан воздух под определенным давлением.

Барабанные счетчики. Состоят из барабана, разделенного перегородками той или иной формы на несколько равновеликих измерительных камер. Смещение центра тяжести барабана от вертикали, проходящей через ось его вращения, при поступлении в него жидкости вызывает периодический или непрерывный поворот барабана. В счетчиках газа барабан непрерывно поворачивается под действием разницы давлений газа на входе и выходе. Барабанные счетчики применяют только при измерении объемного количества жидкости или газа. Однако он может применяться и для измерения массы прошедшей жидкости (барабанный счетчик с противодействующим контргрузом).

На рис. 5, приведен пример устройства трехкамерного барабанного счетчика жидкости. Вокруг оси счетчика имеется кольцевая трубка, по которой поступает жидкость, выливающаяся затем во внутренний цилиндр. Последний имеет три щелевых отверстия, сообщающиеся с измерительными камерами. Из цилиндра жидкость через нижнюю щель перетекает в измерительную камеру 1. При этом равновесие счетчика не нарушается, так как камера занимает симметричное положение относительно центральной вертикальной оси. После заполнения камеры 1 повышается уровень в цилиндре и жидкость через щель начнет заполнять камеру 2. Тогда центр тяжести сместится влево, и счетчик повернется на 120° против часовой стрелки. Жидкость через отверстие 7 выльется из камеры 1 в корпус

прибора, соединенный с выходной трубкой, а камера 2, продолжая заполняться, займет нижнее положение. Трубочки, заканчивающиеся открытыми концами в торцевой стенке счетчика, служат для удаления воздуха из камер. Стаканчики, которые впаивают в торцевые стенки камер, позволяют точно подогнать объем последних к заданному расчетному значению. Для того чтобы камеры не опорожнялись слишком быстро, а так же чтобы избежать возможное проскакивания барабана с преждевременным попаданием жидкости в соседнюю камеру делают перегородки (на рис. 2.20 отмечены штриховой линией), которые тормозят выливание жидкости.

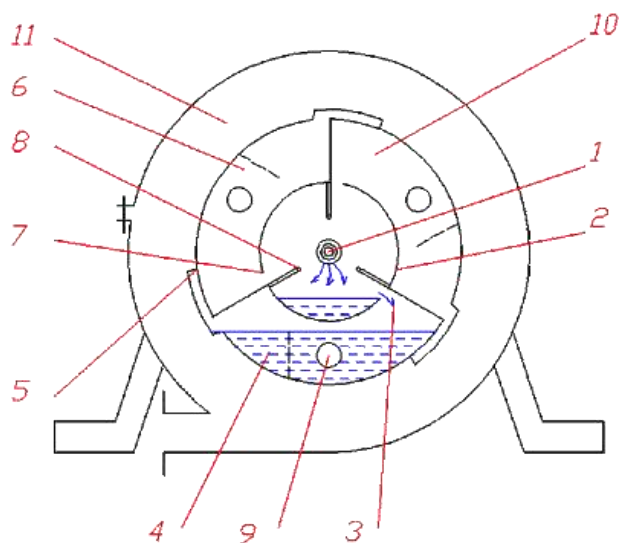


Рис. 2.20. Барабанный трехкамерный счетчик:

- 1 – кольцевая трубка; 2 – внутренний цилиндр; 3 – нижняя щель;
 4 – измерительная камера 1; 5 – щель во внутреннем цилиндре;
 6 – измерительная камера 2; 7 – отверстие истечения камеры 1;
 8 – трубочка; 9 – стаканчик; 10 – измерительная камера 3; 11 – корпус

Промышленностью выпускаются барабанные счетчики с номинальным объемом каждой камеры 0,33, 1, 2, 5, 10 и 20 л., обеспечивающие погрешность не более (1-2) %. Такие счетчики применяют для измерения количества различных жидкостей, причем для агрессивных их изготавливают из керамических материалов.

Существуют конструкции счетчиков с большим числом измерительных камер, но без внутреннего цилиндра. Поэтому жидкость из отверстия в кольцевой трубке, которая идет вдоль оси, поступает в одну или сразу две измерительные камеры, находящиеся под этим отверстием. Форма камер несимметрична относительно вертикали, проходящей через ось, и по мере заполнения камер центр тяжести счетчика сдвигается вправо. Это приводит к тому, что барабан постоянно вращается.

Погрешность барабанного счетчика зависит:

- от поверхностного натяжения жидкости;
- от ее температуры;
- от вязкости и плотности;
- от трения в опорах.

Причем чем больше расход, тем больше будет влияние вышеперечисленных факторов на погрешность.

Благодаря хорошим метрологическим характеристикам барабанные счетчики применяют всегда, когда нужна высокая точность измерения, а измеряемая жидкость находится под атмосферным или небольшим избыточным давлением.

Барабанные счетчики газа на производстве практически не применяются, они сохранили свое значение только для лабораторных работ.

Камерные счетчики жидкости других типов

Помимо рассмотренных выше имеются камерные счетчики жидкости с другими формами подвижного разделительного элемента. Рассмотрим некоторые из них.

Дисковой счетчик жидкости. Разделительным элементом в данном расходомере является диск с центральным шаром (Рис. 2.21), опирающийся на шаровую пятю, который под давлением поступающей жидкости совершает сложное колебательно-нutationное движение. При этом поверхность диска катится по конусам измерительной камеры, а его радиальная прорезь перемещается вверх и вниз вдоль радиальной перегородки. Дисковые счетчики нашли применение для измерения различных нефтепродуктов и других жидкостей, но с появлением счетчиков с овальными шестернями область их применения значительно уменьшилась. Дисковые счетчики изготовлялись на калибры от 15 до 150 мм.

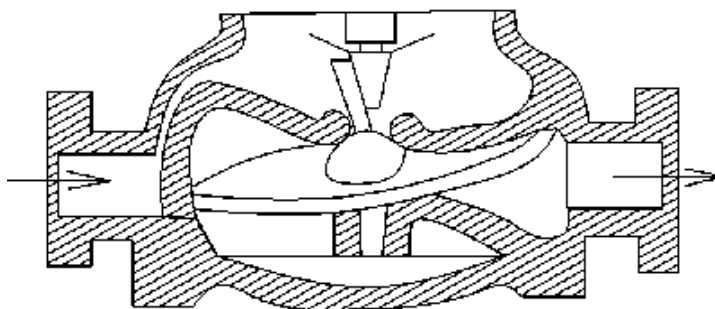


Рис. 2.21. Устройство дискового счетчика жидкости

Винтовые счетчики. Данные счетчики применяют для измерения количества жидкости при небольших и малых ее расходах. Винтовой счетчик состоит из двух винтов с циклоидальным профилем, которые совместно вращаются под давлением поступающей жидкости. Один из винтов имеет выпуклый профиль нарезки, другой – вогнутый. Винтовые счетчики изготавливают на калибры от 6 до 40 мм.

Расходомер с комбинированным преобразователем расхода.

В расходомере данного типа (Рис. 2.22) имеются два преобразователя расхода – зубчато-винтовой и поршневой.

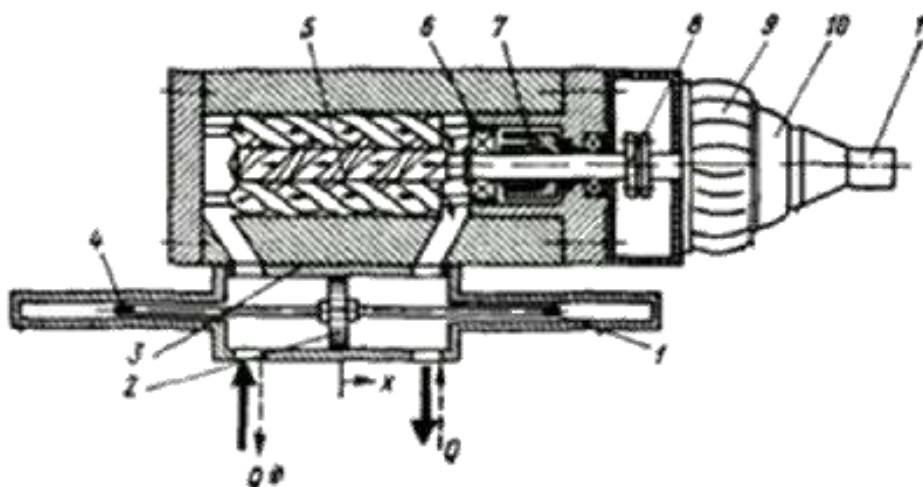


Рис. 2.22. Комбинированный преобразователь расхода

Средний ротор 5 зубчато-винтового преобразователя приводится во вращение с помощью двигателя 9 мощностью 3 кВт через муфту 8. Вал ротора, снабженный уплотнительной муфтой 7, вращается в подшипниках 6. Уплотнительная муфта рассчитана на давление до 20 МПа. Имеются два боковых ротора, которые также предназначены для уплотнения. Частота вращения роторов такова, что давление на входе равно давлению на выходе. Благодаря этому при неизменном расходе поршень 2 в цилиндре 3 не перемещается. Но при появлении разности давлений с обеих сторон поршня 2 из-за изменения расхода, последний начинает перемещаться. Тогда преобразователь 1 положения поршня дает сигнал регулирующему устройству 12, которое изменяет частоту вращения двигателя 9, пока давления жидкости на входе и выходе не сравняются и перемещение поршня прекратится. Таким образом, частота вращения двигателя 9 пропорциональна объемному расходу. Вал двигателя снабжен двумя тахометрическими преобразователями 10 и 11 для выработки аналогового и цифрового сигналов. Малоинерционный поршень 2 снабжен преобразователем 4 скорости своего перемещения, вырабатывающим аналоговый

измерительный сигнал перемещения. Этот поршень предназначен для измерения быстропеременной (пульсационной) составляющей расхода в пределах до 500 Гц. Аналоговые сигналы складывают с помощью устройств 13-15.

Данный **расходомер** имеет большой диапазон измерения 4000:1, который достигается при помощи изменения частоты вращения двигателя от 1 до 4000 об/мин. Предельный расход 260 м³/ч. Погрешность менее $\pm 0,5$ %. Потеря давления не более 2000 Па. Прибор предназначен для измерения расхода минерального масла в прямом и обратном направлениях.

Для измерения количества и расхода жидкости в трубах небольшого диаметра целесообразно применение преобразователей ролик-лопастного типа. У преобразователей данного вида лопасти не выдвижные и представляют одно целое с вращающимся цилиндром, а роликовые замыкатели – цилиндрические серповидного сечения. Внутри корпуса, образующего кольцевую измерительную камеру, соосно с последней помещен цилиндрический ротор, имеющий две лопасти. Жидкость, поступающая через канал, своим давлением на лопасть приводит ротор во вращение. При этом жидкость, находящаяся в кольцевой измерительной камере, уходит через выводной канал. Оси двух цилиндрических замыкателей вращаются вместе с осью ротора, так как связаны с ним шестеренками. Цилиндрические замыкатели предназначены для отделения входного и выходного каналов друг от друга. Вращающиеся элементы установлены на шарикоподшипниках. Основным достоинством преобразователей донного типа является их высокая точность в очень широком диапазоне вязкостей.

2.4. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ РАСХОДОМЕРЫ

Существует ряд приборов для измерения объемного расхода жидкостей, чувствительный элемент которых не имеет непосредственного контакта с измеряемым веществом, что позволяет использовать их там, где работа других расходомеров невозможна (например, при измерении расхода агрессивных сред – кислот, щелочей, растворов и взвесей). К таким приборам относят электромагнитные и ультразвуковые расходомеры.

Принцип действия электромагнитных расходомеров основан на законе электромагнитной индукции, согласно которому в проводнике, движущемся в магнитном поле, будет наводиться электродвижущая сила (ЭДС), пропорциональная скорости движения проводника. В электромагнитных расходомерах (Рис. 2.23) роль проводника выполняет электропроводная жидкость, протекающая по трубопроводу и пересекающая магнитное поле

созданное электромагнитом. При этом в жидкости будет наводиться ЭДС, пропорциональная скорости ее движения, т.е. расходу жидкости.

Рассмотрим более подробно физическую картину появления ЭДС. Любой водный раствор, кроме дистиллированной или глубоко очищенной воды является электролитом, то есть в нем присутствуют диссоциированные молекулы солей, кислот, оснований. Таким образом, в водном растворе практически всегда есть свободные носители заряда. В естественных условиях число катионов и анионов равно, и жидкость электрически нейтральна.

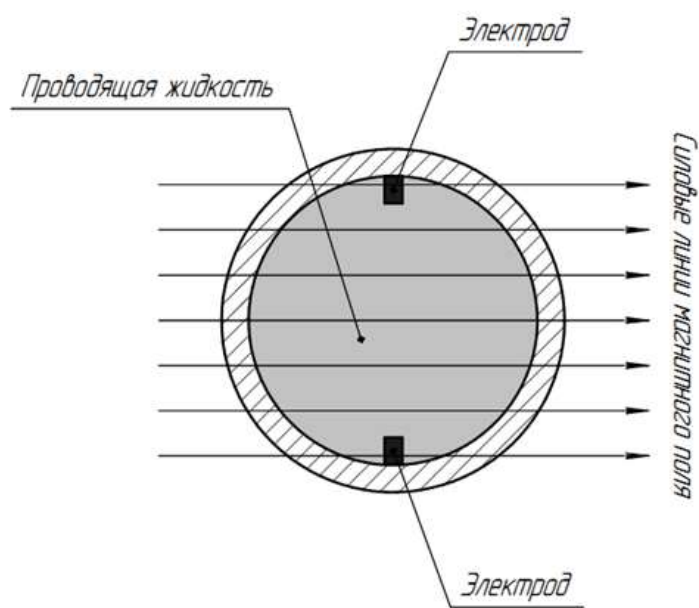


Рис. 2.23. Общая схема расположения элементов электромагнитного расходомера

При движении жидкости по трубопроводу вместе с массой воды переносятся и свободные носители заряда. А направленное движение заряженных частиц является электрическим током. Только в движущейся нейтральной жидкости текут два тока, образованные потоком анионов и катионов, равные по модулю и противоположные по направлению. Если поместить поток жидкости в магнитное поле, силовые линии которого перпендикулярны потоку, то на каждую движущуюся заряженную частицу будет действовать сила Лоренца, направление которой будет перпендикулярно вектору индукции магнитного поля и вектору скорости заряженной частицы. В результате положительно и отрицательно заряженные частицы будут смещаться в противоположные стороны, то есть произойдет разделение объемных зарядов в жидкости.

До каких пор заряды будут разделяться? Казалось бы, если магнитное поле достаточно протяженное, то все заряды должны пространственно разделиться? Однако это не так. При разделении объемных зарядов на них из-за электростатического взаимодействия начинает действовать сила Кулона. Если сила Лоренца разделяет заряды, то сила Кулона притягивает разноименно заряженные частицы. В какой-то момент эти силы сравниваются.

Следовательно, в основе принципа действия электромагнитного расходомера лежит именно стационарное равновесие между силами Лоренца (F_L) и Кулона (F_K) (Рис. 2.24). Степень разделения зарядов зависит в этом случае от величины силы Лоренца, а она, в свою очередь, – от скорости потока жидкости. Запишем условие наступления такого равновесного состояния с учетом ортогональности векторов скорости и индукции поля: $F_L = F_K$ или $qvB = qE$, откуда $E = vB$, где q – разделенный заряд; v – модуль скорости потока; B – модуль индукции магнитного поля; E – модуль напряженности электрического поля, создаваемого разделенными зарядами.

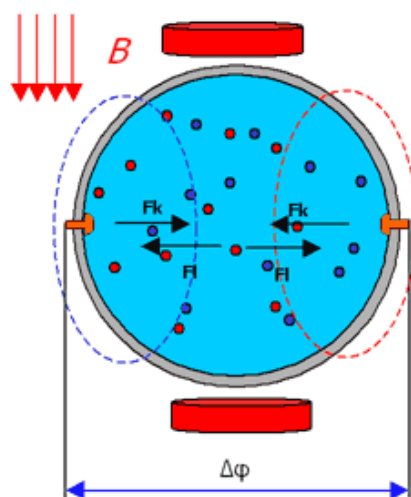


Рис. 2.24. Смещение зарядов в жидкости

Таким образом, разность потенциалов между измерительными электродами зависит только от скорости течения жидкости, индукции магнитного поля и расстояния между электродами: $\Delta\phi = Ed = vBd$, где d – расстояние между электродами.

Объемный расход $Q = vS$ и разность потенциалов между электродами прямо пропорциональны скорости течения, а значит, прямо пропорциональны друг другу: $\Delta\phi = QBd/S$, где S – площадь сечения трубы. Отсюда видно, что измеряемое на электродах напряжение прямо пропорционально объемному расходу проводящей жидкости.

В идеальном случае измеряемый на электродах сигнал прямо пропорционален расходу. На практике на эту простую зависимость влияет множество факторов – электрохимический шум, наводки, турбулентность потока.

Выходной сигнал первичного преобразователя снимается с двух изолированных электродов, установленных в трубе из непроводящего немагнитного материала, либо в трубе имеющей изоляцию в зоне измерения. Это необходимо, чтобы исключить шунтирование наводимой ЭДС через стенку трубопровода.

Для уменьшения турбулентности потока в зоне измерения рекомендуется монтировать расходомер в прямолинейные участки без изменения сечения на протяжении 5...10 диаметров трубы до и после расходомера.

Электромагнитные расходомеры могут быть выполнены как с постоянными магнитами, так и с электромагнитами, питаемыми переменным током.

Существенным и основным недостатком электромагнитных расходомеров с постоянным электромагнитом, ограничивающим их применение для измерения слабопульсирующих потоков, является поляризация измерительных электродов, при которой изменяется сопротивление преобразователя, а следовательно, появляются существенные дополнительные погрешности. Поляризацию уменьшают, применяя электроды из специальных материалов (угольные, каломелиевые) или специальные покрытия для электродов (платиновые, танталовые). Такие расходомеры зачастую требуют каждодневного технического ухода (подрегулировка нуля, поднастройка и т.п.).

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

- трансформаторный эффект, когда на витке, образуемом жидкостью, находящейся в трубопроводе, электродами, соединительными проводами и вторичными приборами наводится трансформаторная ЭДС, источником которой является обмотка электромагнита или внешние синхронные наводки (например, от соседних расходомеров). Для их компенсации в измерительную схему прибора вводят компенсирующие цепи или питают электромагнит переключаемым постоянным током.

- ёмкостный эффект, возникающий из-за большой разности потенциалов между системой возбуждения магнитного поля и электродами и паразитной

емкости между ними (соединительные провода и т. п.). Средством борьбы с этим эффектом является тщательная экранировка.

Достоинством электромагнитных расходомеров является отсутствие дополнительных потерь давления на участке измерения, что объясняется отсутствием деталей, выступающих внутрь трубы. Благодаря этому гидравлические потери на приборе минимальны. Отсутствие полых углублений исключает застаивание и коагулирование измеряемого продукта. Поэтому эти расходомеры используют в биохимической и пищевой промышленности, где доминирующими являются требования к стерильности среды. На показания электромагнитных расходомеров не влияют физико-химические свойства измеряемой жидкости (вязкость, плотность, температура и т. п.), если они не изменяют её электропроводность.

В случае использования изоляционных антикоррозийных покрытий, устойчивых к механическим воздействиям с помощью электромагнитных расходомеров успешно решается задача измерения расхода агрессивных, абразивных и вязких жидкостей и пульп.

Метод чувствителен к неоднородностям (пузырькам), турбулентности потока, неравномерности распределения скоростей потока в сечении канала.

Расходомеры (особенно с постоянными магнитами) могут забивать сечение трубы металлическим мусором, удерживаемым магнитной системой расходомера. Для борьбы с этим явлением расходомеры с электромагнитами периодически отключаются на короткое время, чтобы поток воды унес мусор.

Электромагнитные расходомеры применяют для измерения очень малых ($3 \cdot 10^{-9} \text{ м}^3/\text{с}$) расходов (например, для измерения расхода крови по кровеносным сосудам) и больших расходов жидкостей ($3 \text{ м}^3/\text{с}$). Причём диапазон измерения расходомера одного типоразмера достигает значения 500:1.

Отмеченные преимущества и обеспечили достаточно широкое распространение электромагнитных расходомеров, несмотря на их относительную конструктивную сложность.

Недостатками электромагнитных расходомеров являются чувствительность к помехам от переменных электромагнитных полей и ограничения по электрической проводимости измеряемой среды. Электромагнитные расходомеры непригодны для измерения расхода газов, а также жидкостей с электропроводностью менее $10^{-3} - 10^{-5} \text{ сим/м}$ ($10^{-5} - 10^{-7} \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$), например, лёгких нефтепродуктов, спиртов и т. п. Вместе с тем в настоящее время разрабатываются специальные устройства, позволяющие существенно снизить требования к электропроводности

измеряемых сред и создать электромагнитные расходомеры для измерения расхода любых жидкостей, в том числе и нефтепродуктов.

Электромагнитные расходомеры нашли широкое применение в металлургической, биохимической и пищевой промышленности, в строительстве и руднообогатительном производстве, в медицине, так как они малоинерционны по сравнению с расходомерами других типов, в учёте водных и энергетических ресурсов (в частности в отопительных системах).

Погрешность данных приборов определяется в основном погрешностями их градуировки и измерения разности потенциалов. Классы точности 1 – 1,5.

Внешний вид одного из самого популярного на объектах ЖКХ электромагнитного расходомера «Взлет ЭР» представлен на рис. 2.25.



Рис. 2.25. Внешний вид электромагнитного расходомера.

2.5. УЛЬТРАЗВУКОВЫЕ РАСХОДОМЕРЫ

Ультразвуковые расходомеры служат в основном для измерения расхода жидкостей.

Принцип их действия основан на использовании ультразвука, скорость которого относительно трубопровода зависит от скорости измеряемого потока. Если установить источник (А) и приёмник (В) ультразвука со смещением (Рис. 2.26), то о скорости потока можно судить по изменению скорости распространения звуковой волны вдоль отрезка АВ.

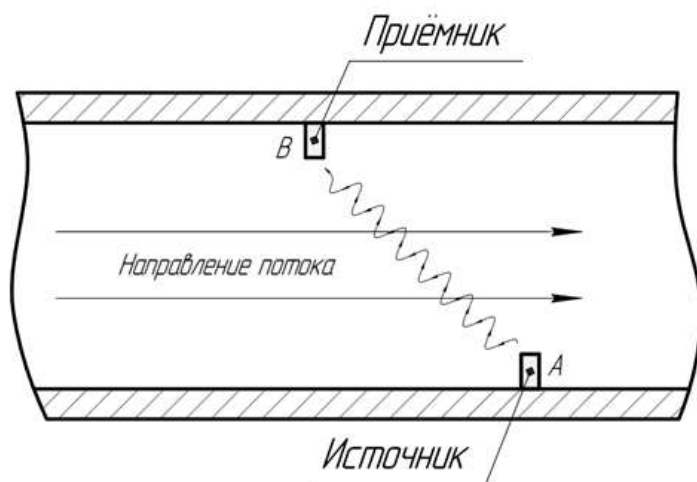


Рис. 2.26. Общая схема расположения элементов ультразвукового расходомера

Кроме того, для измерения локальной скорости потока может быть использован эффект Доплера, для этого источник и приёмник располагаются как указано на рис. 2.27. Исходный сигнал, а также сигнал с приёмника отправляются на смеситель. Частота ультразвука, которую фиксирует приёмник, изменяется в зависимости от скорости потока, исходная частота остаётся неизменной. Частота сигнала на выходе из смесителя является разностью частот исходного и принятого сигнала – по этой величине можно однозначно судить о локальной скорости вещества в потоке.

На рис. 2.28 показаны основные элементы ультразвукового расходомера. Излучатель и приемник ультразвуковых колебаний закрепляется на трубе, имеется также измеритель времени прохождения импульсом расстояния между излучателем и приемником. Приемник в виде пьезоэлемента преобразует механическую деформацию, вызванную ультразвуком, в электрический сигнал.

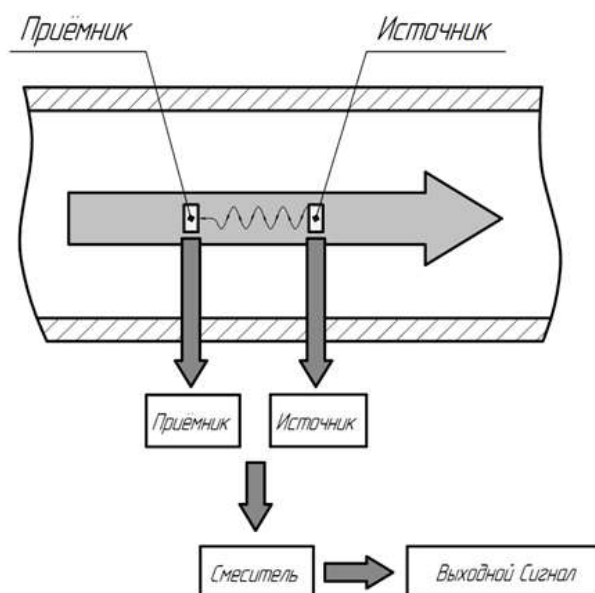


Рис. 2.27. Общая схема расположения элементов расходомера на эффекте Доплера

Перед началом эксплуатации расходомер заполняют жидкостью, расход которой будут измерять, и определяют время прохождения импульсом этого расстояния в стоячей среде. При движении потока его скорость будет складываться со скоростью ультразвука, что приведет к уменьшению времени пробега импульса. Это время, преобразуемое в блоке в унифицированный токовый сигнал, будет тем меньше, чем больше скорость потока, т.е., чем больше его расход.

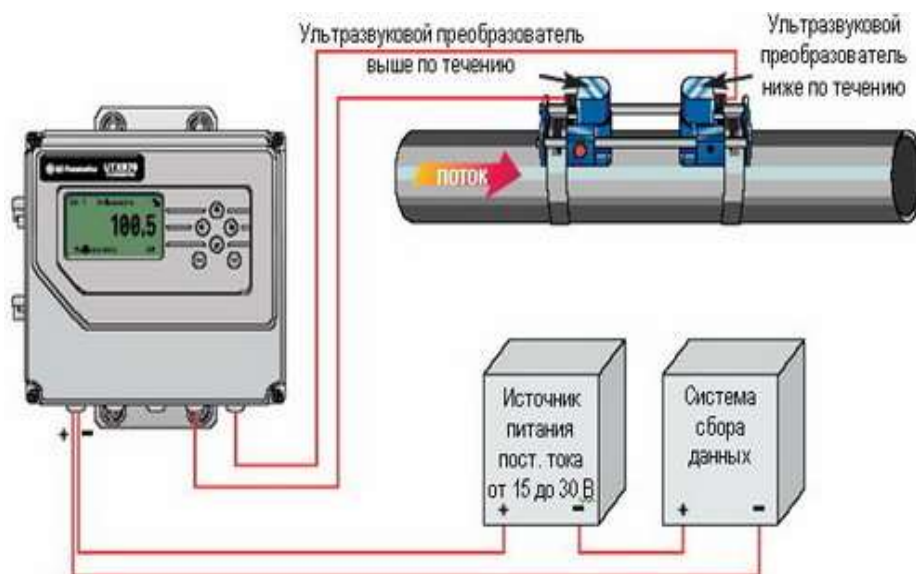


Рис. 2.28. Основные элементы ультразвукового расходомера

По методу измерения интервала времени ультразвуковые расходомеры разделяют на частотные, фазовые и времяимпульсные.

Достоинствами ультразвуковых расходомеров являются возможность установки прибора на трубопроводах диаметром от 10 мм и более, а также измерение расхода любых жидких сред, в том числе и неэлектропроводных, а также:

- ✓ малое или полное отсутствие гидравлического сопротивления;
- ✓ надежность (так как нет подвижных механических элементов);
- ✓ высокая точность;
- ✓ быстроедействие;
- ✓ высокая помехозащищенность.

Недостатки таких расходомеров – необходимость индивидуальной градуировки, зависимость от профиля скоростей, который меняется с изменением расхода, влияние на показания изменений физико-химических свойств вещества и его температуры, от которых зависит скорость ультразвука. Основная погрешность этих расходомеров при отсутствии коррекции на изменение скорости звука составляет 3-4 %.

Примеры измерения с помощью ультразвукового расходомера приведены на рис. 2.29.



Рис. 2.29. Ультразвуковые расходомеры жидкости

2.6. ВИХРЕВЫЕ РАСХОДОМЕРЫ-СЧЕТЧИКИ ЖИДКОСТИ

Принцип действия вихревых расходомеров с телом обтекания заключается в фиксации вихрей возникающих за телом, помещенным в поток. Частота срыва вихрей (так называемая «дорожка Кармана») пропорциональна объемному расходу.

Фиксация вихрей может осуществляться разными методами. Индуктивным, когда в теле обтекания располагаются две катушки индуктивности, а в специальной полости между катушками находится свободно размещенная мембрана. Мембрана под действием вихрей

перемещается от одной катушки к другой и частота изменения индуктивности катушек пропорциональна объемному расходу.

Выпускаются вихревые расходомеры с электромагнитным узлом съема сигнала и ультразвуковыми датчиками.

В случае применения электромагнитного узла съема сигнала, в теле обтекания делается отверстие и вблизи нее в теле по перпендикулярным диаметрам располагаются два постоянных магнита и два электрода, электрически изолированные от проточной части отверстия. По сути, датчик преобразования пульсаций представляет собой маленький электромагнитный расходомер с постоянными магнитами. Но так как измеряется пульсирующий поток, используются постоянные магниты не требующие электрического питания, а электронные компоненты в электронных блоках потребляют мало энергии. Поэтому электронные блоки могут питаться от литиевых батарей. Но имеется недостаток – на постоянных магнитах могут накапливаться магнитные частички, если они есть в измеряемой среде. Желательно перед расходомером такого типа устанавливать магнито-механический фильтр и периодически проверять состояние отверстия в теле обтекания.

В случае использования ультразвуковых датчиков поток просвечивается за телом обтекания и фиксируются вихреобразования. Электроника у такого вихревого расходомера получается проще, чем у времяпролетного ультразвукового расходомера, поэтому приборы получаются более дешевые.

Принцип действия прибора основан на определении частоты вихрей, образующихся в потоке среды при обтекании тела специальной формы, установленном в проточной части преобразователя расхода. Частота вихрей пропорциональна объемному расходу, определяется при помощи двух пьезодатчиков, которые фиксируют пульсации давления в зоне вихреобразования.

На рис. 2.30 показана конструкция вихревого расходомера с телом обтекания. Прибор представляет собой моноблок, состоящий из корпуса и электронного блока. В корпусе проточной части датчика размещены первичные преобразователи объемного расхода, избыточного давления и температуры. На входе в проточную часть датчика установлено тело обтекания 1. За телом обтекания, по направлению потока газа, симметрично расположены два пьезоэлектрических преобразователя пульсаций давления 2. Преобразователь избыточного давления 3 тензорезисторного принципа действия размещен перед телом обтекания вблизи его крепления. Термопреобразователь сопротивления платиновый 4 размещен внутри тела обтекания. Для обеспечения непосредственного контакта измеряемой среды и термосопротивления в теле обтекания выполнены отверстия 5. Плата

цифровой обработки 6 производит обработку сигналов и передает их на вычислитель 7.

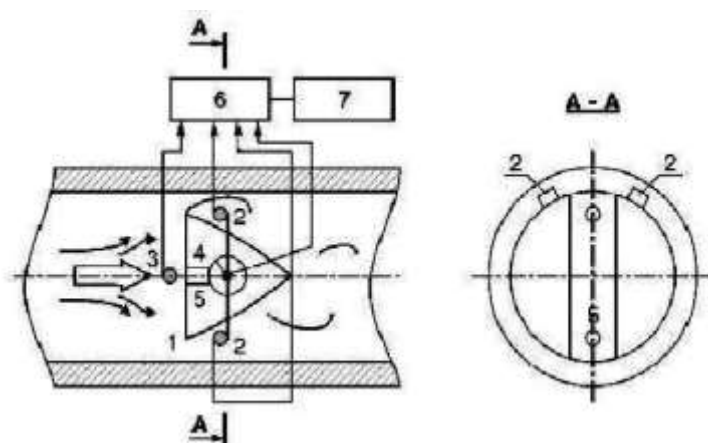


Рис. 2.30. Вихревой расходомер с телом обтекания:

- 1 – тело обтекания, 2 – пьезоэлектрические преобразователи пульсаций давления, 3 – преобразователь избыточного давления,
- 4 – термопреобразователь сопротивления, 5 – отверстие,
- 5 – плата цифровой обработки, 7 – вычислитель

На рис. 2.31 представлена схема измерения расхода с использованием системы тензодатчиков. В расходомерах данного типа основным элементом является дискообразная или шарообразная мишень, укрепленная на эластичном тросе, один противоположный конец которого неподвижно закреплен. Поток жидкости или газа приводит к смещению мишени, что

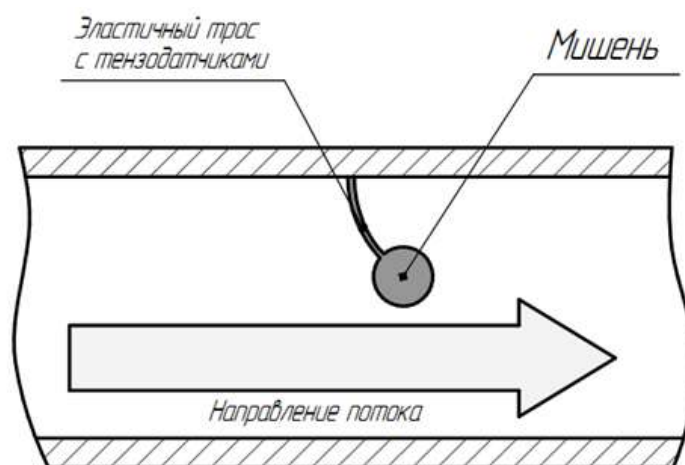


Рис. 2.31. Схема расположения элементов вихревого расходомера с мишенью

вызывает деформацию троса, а установленные на нём тензодатчики регистрируют тип и степень деформации. Полученные данные позволяют судить о скорости потока вещества, а также о его направлении.

Достоинством таких датчиков является возможность проведения измерений расхода и скорости потока в двух или даже в трёх различных направлениях. Для обеспечения подобной многозадачности необходимо обеспечить симметричность мишени для всех нужных направлений.

На рис. 2.32 представлен внешний вид различных модификаций вихревых расходомеров.



Рис. 2.32. Различные модификации вихревых расходомеров

1.7. ТЕПЛОВЫЕ РАСХОДОМЕРЫ

Тепловые расходомеры – расходомеры, измеряющие зависящий от расхода эффект теплового воздействия на поток или тело, контактирующий с потоком.

В основе метода лежит простая идея: если локально изменять свойства вещества в потоке (например, температуру) и регистрировать эти изменения на некотором удалении от места воздействия, можно определить среднюю скорость перемещения вещества в потоке (рис. 2.33). Допустим, что в потоке установлена пара датчиков температуры (A и B) и один нагревательный элемент C , причём расстояния $AC > BC$. Если вещество неподвижно, повышение температуры происходит локально за счёт теплопроводности, и датчик B нагревается быстрее, поскольку расположен ближе к нагревательному элементу. Если же поток придёт в движение, температура в области A упадёт до исходной температуры вещества в потоке, а температура в области B будет чуть выше исходной. Анализ данных с датчиков позволяет однозначно судить о скорости перемещения вещества в потоке.

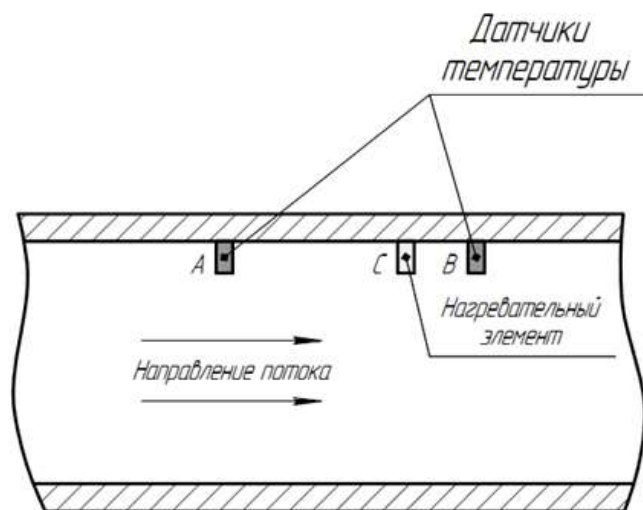


Рис. 2.33. Общая схема расположения ключевых элементов теплового расходомера

По конструкции тепловые расходомеры отличаются способом нагрева, расположением нагревателя (снаружи или внутри трубопровода), характером функциональной зависимости между расходом и измеряемым сигналом. Основной способ нагрева – электрический омический. Иногда используется индуктивный нагрев с помощью электромагнитного поля и с помощью жидкостного теплоносителя. По способу теплового взаимодействия с потоком тепловые расходомеры можно разделить на **калориметрические**, **термоконвективные** и **термоанемометрические**. При электрическом омическом нагреве у калориметрических расходомеров нагреватель расположен внутри, а у термоконвективных – снаружи трубы.

У **калориметрических** и **термоконвективных** расходомеров измеряется разность температур газа или жидкости (при постоянной мощности нагрева) или же мощность (при постоянной разности температур). У термоанемометров измеряется сопротивление нагреваемого тела (при постоянной силе тока) или же сила тока (при постоянном сопротивлении).

Термоконвективные расходомеры разделяются на квазикалориметрические и теплового пограничного слоя. В квазикалориметрических расходомерах вычисляется разность температур потока, или мощность нагрева. В расходомерах теплового пограничного слоя вычисляется разность температур пограничного слоя или мощность нагрева, основная область применения – измерения расхода в трубопроводах диаметром до 100 мм. В трубах большого диаметра используются:

- парциальные расходомеры с нагревателем на обводной трубе;
- парциальные расходомеры с тепловым зондом;
- парциальные расходомеры с наружным нагревом ограниченного участка трубы.

Достоинством калориметрических и термоконвективных расходомеров является то, что они измеряют массовый расход при постоянной теплоемкости среды, отсутствие контакта с измеряемой средой. Недостаток термоконвективных расходомеров – большая инерционность. Для повышения быстродействия используют корректирующие схемы и импульсный нагрев.

Иногда используют тепловые расходомеры с нагревом электромагнитным полем или жидкостным теплоносителем. Достоинство тепловых расходомеров с нагревом электромагнитным полем – относительно низкая инерционность, их применяют для измерения расхода электролитов и диэлектриков, селективно-серых агрессивных жидкостей. Электромагнитное поле образуется с помощью излучателей энергии высокой частоты, сверхвысокой частоты или инфракрасного диапазона. Расходомеры с жидкостным теплоносителем используются для измерения расхода пульп, расхода газожидкостных потоков.

Предел использования термоконвективных расходомеров – 150-250 °С, при использовании нагрева электромагнитным полем или жидкостным теплоносителем – до 450 °С.

Калориметрические расходомеры основаны на зависимости от мощности нагрева среднемассовой разности температур потока. Калориметрический расходомер состоит из нагревателя, расположенного внутри трубопровода, и двух термопреобразователей для измерения температур до и после нагревателя. Термопреобразователи располагаются обычно на равных расстояниях от нагревателя. Распределение температур по обе стороны от источника нагрева будет зависеть от расхода вещества. При отсутствии расхода температурное поле симметрично. При появлении расхода эта симметрия нарушается. Рост разности температур при малых значениях расхода почти пропорционален расходу. Затем этот рост замедляется и после достижения максимума начинается падение разности температур по гиперболическому закону. Расположение термопреобразователей влияет на градуировочные кривые.

Калориметрические расходомеры с внутренним нагревом не получили распространения в промышленности из-за малой надежности работы в эксплуатационных условиях нагревателей и термопреобразователей, располагаемых внутри трубопровода. Они более пригодны для различных исследовательских и экспериментальных работ. Кроме того, целесообразно применять их в качестве образцовых приборов для поверки и градуировки других расходомеров. При этом особенно ценным является то, что они измеряют массовый расход.

Термоконвективными называются тепловые расходомеры, у которых нагреватель, и термопреобразователь размещаются снаружи трубопровода, что увеличивает эксплуатационную надежность расходомеров и удобство для применения. Передача тепла от нагревателя к измеряемой среде производится за счет конвекции через стенку трубы.

Разновидности термоконвективных расходомеров:

1. квазикалориметрические расходомеры
 - с симметричным расположением термопреобразователей;
 - с нагревателем, совмещенным с термопреобразователем;
 - с нагревом непосредственно стенки трубы;
 - с асимметричным расположением термопреобразователей;
2. расходомеры, измеряющие разность температуры пограничного слоя;
3. расходомеры особых разновидностей для труб большого диаметра.

Квазикалориметрические расходомеры (первая группа) имеют градуировочные характеристики аналогичные калориметрическим расходомерам и две ветви: восходящую и нисходящую, а у расходомеров второй группы – только одну ветвь, так как у них преобразователь начальной температуры изолирован от нагревательного участка трубы. Кроме того, квазикалориметрические расходомеры применяются преимущественно для труб диаметром от 0,5-1,0 мм и выше.

Чем больше диаметр трубы, тем в меньшей степени прогревается центральная часть потока, и прибор все в большей мере измеряет лишь разность температур пограничного слоя, которая зависит от его коэффициента теплоотдачи, а значит, и от скорости потока. При малых диаметрах прогревается весь поток и здесь так же, как и в калориметрических расходомерах, измеряется разность температур потока с той и другой стороны нагревателя.

Тепловые расходомеры, измеряющие разность температур пограничного слоя. Их существенный признак – отсутствие прогрева центральной части потока, так как применяют их для труб с диаметром не менее 50 мм. В результате в них измеряется не разность средних температур потока до и после нагревателя, а разность температур с обеих сторон пограничного слоя.

Расходомеры особых разновидностей трубопроводов большого диаметра. При измерении расхода веществ, имеющих высокую температуру, а также веществ, температура которых может существенно изменяться, следует стабилизировать или вообще исключить потерю тепла в

окружающую среду. Этого можно достичь с помощью дополнительного компенсационного нагревателя, установленного по всей длине измерительного участка. Нагреватель поддерживает заданную разность температур в поперечном сечении теплоизоляции независимо от температуры и расхода измеряемого вещества. Эта разность контролируется дифференциальной термопарой, сигнал которой поступает в автоматический регулятор, управляющий через блок питания током, поступающим в компенсационный нагреватель.

Для измерения расхода в трубах большого диаметра служит метод, основанный на применении теплового зонда. Преобразователь местной скорости здесь по внешней форме напоминает напорную трубку Пито диаметром 18 мм. После обтекаемой конусообразной носовой части расположена медная трубка ($d = 18$ мм), на внутренней поверхности которой помещен терморезистор, контролирующий температуру поступающего газа. Затем имеется небольшая теплоизоляционная втулка, за которой находится вторая медная трубка ($d = 18$ мм) с расположенными на внутренней поверхности последовательно электронагревателем и вторым терморезистором, контролирующим температуру нагретой стенки, зависящей от местной скорости потока. Провода от терморезисторов и нагревателя выводятся через держатель, перпендикулярный к измерительной части зонда, имеющей длину около 140 мм. Для измерения расхода измерительную часть зонда надо установить в том месте, где имеется средняя скорость потока.

Элементы конструкции термоконвективных расходомеров

Нагреватель и термопреобразователи – основные элементы термоконвективных расходомеров. Обычно на трубу, покрытую изоляцией (слода, титановая эмаль и т. п.), наматывают провод тех или других марок (ПЭВ, ПЭТВ, ПЭТК и т. п.), а также манганиновую или нихромовую проволоку. При диаметрах труб от 1 до 50 мм длина нагревателя от 10 до 100 мм, диаметр проволоки 0,1-0,2 мм, сопротивление 10-150 Ом, мощность 0,1-100 Вт, сила тока 1-500 мА, снижаемая до 0,1 мА при взрывобезопасном исполнении. Известны случаи применения для нагрева полупроводниковых пленок, в частности слоя хлористого олова, нанесенного на титановую эмаль. При этом снижается тепловая инерция. Термопреобразователями служат термопары или термометры сопротивления.

В микрорасходомерах, где сложно разместить несколько спаев термопар, обычно применяют термометры сопротивления (медные и никелевые). В остальных расходомерах применяют преимущественно термобатареи (медь-константановые и хромель-копелевые) с числом спаев 8-30. Получаемая термо-ЭДС лежит в пределах от 1 до 10 мВ. Спаи

термобатарей располагают последовательно в местах измерения температур, и таким образом получаемая термо-ЭДС, соответствует разности температур. Спаи должны быть изолированы от стенки трубы и в то же время их температура должна быть как можно ближе к соответствующим температурам стенки. Для изоляции служат синтетические смолы и цемент. Сами же спаи и термоэлектроды должны иметь минимальные размеры, а в эпоксидные компаунды, которые закрепляют спаи на поверхности трубы, рекомендуется добавлять теплопроводные примеси (например, измельченный графит).

Третий элемент конструкции преобразователей термокондуктивных расходомеров – устройство, которое должно максимально уменьшить теплообмен преобразователя с окружающей средой. Это надо как для уменьшения потерь тепла, так и влияния внешних тепловых возмущений. Для этого служат наружный кожух, имеющий теплоизоляционное покрытие, и дополнительная внутренняя труба. Между ними образуется воздушная изоляционная прослойка. Кроме того, эффективно применение внутри кожуха многослойных отражательных экранов из алюминиевой фольги и стеклотенты. При необходимости можно применять дополнительный компенсационный нагреватель, поддерживающий заданную разность температур в поперечном сечении теплоизоляции.

Термоанемометры основаны на зависимости между потерей тепла непрерывно нагреваемого тела и скоростью газа или жидкости, в которых это тело находится. Основное назначение термоанемометров – измерение местной скорости и ее вектора. Они могут служить и для измерения расхода, когда известно соотношение между местной и средней скоростью потока, или когда последняя непосредственно измеряется с помощью термоанемометра. Кроме того, существуют конструкции термоанемометров, специально предназначенных для измерения расхода. Термоанемометры малоинерционны и используются при измерении местных скоростей. Погрешность термоконвективных расходомеров находится в пределах $\pm 1,5-3\%$. У калориметрических расходомеров погрешность равна $\pm 0,3-1\%$.

Большинство термоанемометров относится к термокондуктивному типу со стабильной силой тока нагрева или же с постоянным сопротивлением нагреваемого тела. У первых измеряется электрическое сопротивление тела, являющееся функцией скорости потока, а у вторых – сила греющего тока, которая должна возрастать с ростом скорости потока. Кроме того, в одной группе термокондуктивных преобразователей ток нагрева одновременно служит и для измерения, а в другой – нагревающий и измерительные токи разделены. Через один резистор течет ток нагрева, а через другой,

получающий тепло от первого, – ток, который необходим для измерения. К достоинствам термоанемометров относятся большой диапазон измеряемых скоростей, начиная от весьма малых, и высокое быстродействие, позволяющее измерять скорости, изменяющиеся с частотой в несколько тысяч герц. Недостаток термоанемометров с проволочными чувствительными элементами – хрупкость последних и изменение градуировки по причине старения и перекристаллизации материала проволоки вследствие динамических нагрузок и высокой температуры нагрева.

Преобразователи термоанемометров.

Первичные преобразователи термоанемометров разделяются на проволочные, пленочные и терморезисторные.

Чувствительный элемент проволочного преобразователя – тонкая и обычно короткая проволочка из платины, вольфрама, никеля. Концы проволочки (термонити) приваривают к концам двух манганиновых стерженьков, укрепленных на жестком основании. Наибольшую температуру нагрева $T_{\text{п}}$ проволочки (до 1000 °С) допускает платина. Тарированный вольфрам может работать до 600 °С. Но, во избежание быстрого старения материала, обычно проволочку нагревают только до 400-500 °С. При измерении же вещества, имеющего высокую температуру, термонити укрепляют на основании, охлаждаемом проточной водой. Для предохранения термонити от поломки при большой скорости газового потока принято защищать ее стеклянной оболочкой.

Пленочный преобразователь термоанемометра состоит из круглого стеклянного полого стержня диаметром в несколько миллиметров с клинообразным или конусообразным концом, на которое распылена пленка платины толщиной 50-100 Å в виде небольшой полоски (1 x 0,2 мм). Концы полоски соединены с проводами, проходящими внутри стеклянного стержня. Иногда наносится еще вторая пленка большего размера для температурной компенсации. Пленочные преобразователи значительно прочнее проволочных и могут служить для измерения скоростей газа от 1,5 м/с вплоть до 400-500 м/с при температурах до 500 °С и скоростей жидкости до 18 м/с при температуре до 60 °С. Их инерционность немного больше, чем у проволочных и возрастает с уменьшением скорости. Верхний частотный предел уменьшается от 100 кГц при скорости воздуха 300 м/с до 1 кГц при скорости 1 м/с.

Чувствительным элементом терморезисторного преобразователя служит миниатюрный полупроводниковый терморезистор, обычно в виде шарика или бусинки. Их достоинства – простота конструкции, механическая

прочность и высокая чувствительность. Недостаточная стабильность градуировки в значительной степени уменьшена. Применение их в качестве термоанемометров для измерения скоростей жидкостей и газов при очень высокой температуре все более расширяется. Постоянная времени у них несколько больше, чем у проволочных и пленочных термоанемометров, и в зависимости от размера терморезистора составляет 0,5-2,5 с. Часто преобразователь термоанемометра состоит из двух терморезисторов, один из которых измерительный, а другой – компенсирующий изменение температуры потока.

У термоанемометров, в которых цепь нагрева отделена от цепи измерения терморезистор обычно располагается внутри проволочного нагревателя. Возможны разные конструкции: например, нагреватель намотан на трубку, внутри которой находится терморезистор, или же спираль нагревателя с помощью стекла закрепляется на полупроводниковом шарике и затем запаивается в стеклянный капилляр.

Преобразователи термоанемометрических расходомеров

Преобразователь термоанемометрического расходомера отличается от преобразователя обычного термоанемометра тем, что чувствительный элемент (термонить) находится не в какой-то одной точке потока, а более или менее равномерно распределен по всему его сечению. Погрешность прибора $\pm 2,5\%$.

При измерении расхода воды во избежание выделения из нее растворенного газа, а также образования пара вместо нагрева полупроводникового терморезистора можно производить на основе эффекта Пельтье его охлаждение.

2.8. ИОНИЗАЦИОННЫЙ РАСХОДОМЕР

Ионизационными расходомерами называются приборы, основанные на измерении того или иного зависящего от расхода эффекта, возникающего в результате непрерывной или периодической ионизации потока газа или жидкости.

Ионизационные расходомеры разделяются на две группы:

1. расходомеры, в которых измеряется зависящий от расхода ионизационный ток между электродами, возникающий в результате обычно непрерывной искусственной ионизации потока газа (или жидкости) радиоактивным излучением или электрическим полем;

2. расходомеры, в которых измеряется зависящее от расхода время перемещения на определенном участке пути ионизационных меток, возникающих в результате периодической ионизации потока газа

ионизирующим излучением или электрическим разрядом; эти расходомеры называются меточными ионизационными.

Погрешность расходомеров, основанных на измерении ионизационного тока, около $\pm 5\%$ и применяются они сравнительно редко, преимущественно для измерения скоростей, а не расходов газовых потоков. Кроме того, имеются разработки ионизационных приборов для измерения расхода жидкостей-диэлектриков, в частности расхода промышленного масла. В таких расходомерах погрешность измерения меньше и находится в пределах 2-4 %.

Меточные ионизационные приборы более точные.

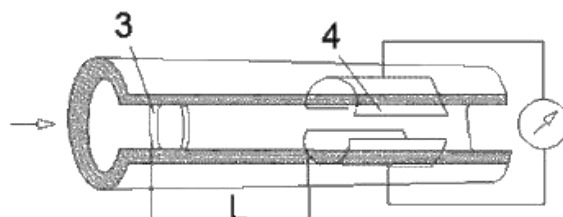
Расходомеры с ионизацией потока газа радиоактивным излучением

– это расходомеры у которых в качестве ионизатора выступает радиоактивное излучение.

Радиоактивный источник, создающий α -или β -излучение, может находиться как внутри (Рис. 2.34, а, в), так и снаружи трубы (Рис. 2.34, с).

Это излучение ионизирует поток газа, движущегося в трубе. Внутри нее помещены два (иногда три) электрода, к которым подана разность потенциалов. Сила ионизационного тока, возникающего между электродами, будет зависеть от числа ионизированных молекул в промежутке между электродами, т. е. от скорости движения газа. Имеются два типа ионизационных расходомеров. В первом – источник излучения и электроды находятся друг от друга на некотором расстоянии L по оси трубы (Рис. 2.34) и ионизационный ток течет вдоль оси трубы. Во втором – ионизационный ток течет не вдоль, а поперек трубы, так как источник излучения и приемные электроды расположены на противоположных сторонах трубы (Рис. 2.35).

В первой схеме (Рис. 2.34, а) слой радиоактивного вещества нанесен на первом по ходу потока электроде 1, второй 2 расположен от первого на расстоянии L . Во второй схеме (Рис. 2.34, б) радиоактивный источник 3 кольцевой формы находится на расстоянии L от двух пластинчатых электродов 4 полукольцеобразной формы, расположенных друг против друга. В третьей схеме (Рис. 2.34, с) радиоактивный источник помещен снаружи трубы в защитном контейнере 5. β -излучение проходит в газопровод



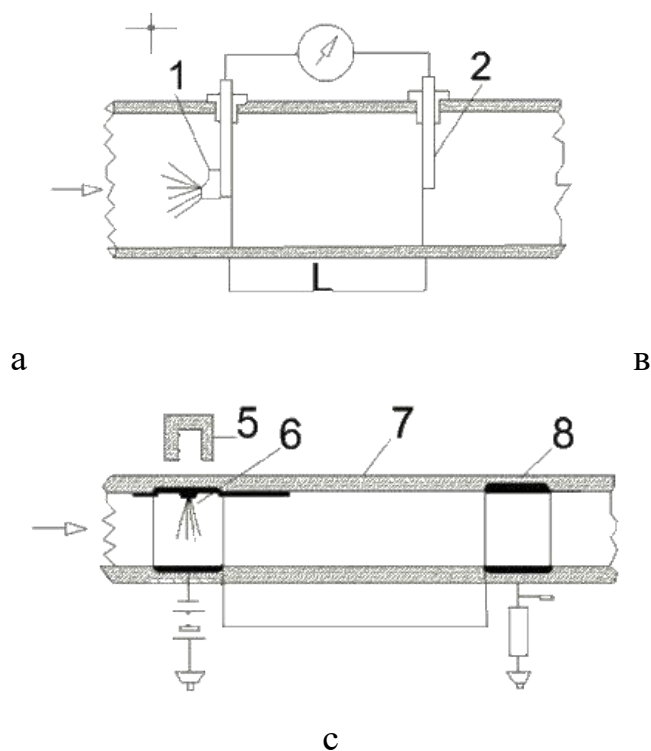


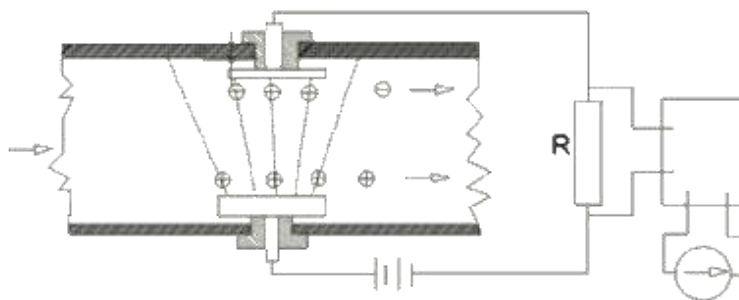
Рис. 2.34. Схемы ионизационных расходомеров, с источниками излучения и приемными электродами расположенными на расстоянии L вдоль оси трубы

через окно, закрытое медной фольгой, и поступает внутрь кольцевого электрода 6. Второй электрод 8 находится на расстоянии L от первого. Стенка трубы 7 изготовлена из изоляционного материала.

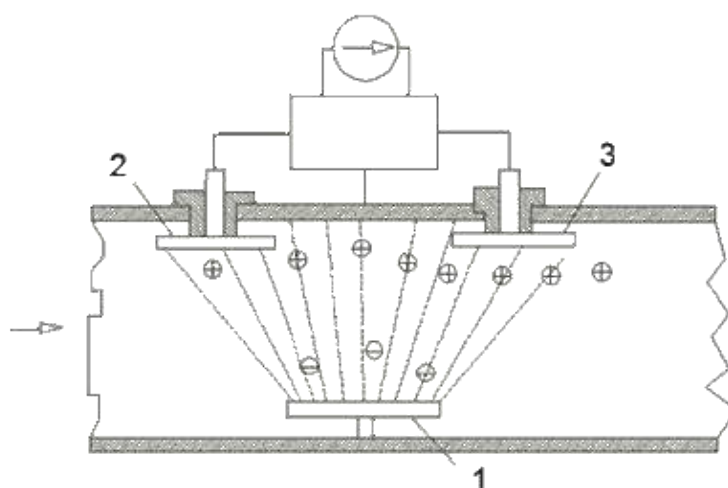
При отсутствии расхода во всех трех схемах все ионизированные молекулы рекомбинируют, прежде чем, достигнут приемного или приемных электродов и тока в цепи не будет. *Рекомбинация носителей зарядов* - процесс, обратный ионизации. При рекомбинации из положительных ионов и электронов образуются нейтральные атомы.

С увеличением расхода будет возрастать число ионизированных молекул, достигающих приемных электродов, и сила тока в цепи станет расти. Вначале рост силы тока пропорционален расходу, но затем станет замедляться. Ток будет стремиться к некоторому постоянному значению, когда все ионизированные молекулы, не успев рекомбинировать, достигнут приемных электродов. При дальнейшем возрастании скорости газа наблюдается даже небольшое уменьшение силы тока, объяснимое тем, что часть ионизированных молекул проносится мимо электродов. В качестве источника радиоактивного излучения, могут использоваться хром, стронций, иттрий, пригодные до температур $300\text{ }^{\circ}\text{C}$, а также америций, применяемый до $150\text{ }^{\circ}\text{C}$.

В схеме, изображенной на рис. 2.35а, напротив излучающего электрода расположен один приемный электрод, а в схеме на рис. 2.35в – два приемных электрода 2 и 3 расположены симметрично относительно излучающего электрода 1 и включены навстречу друг другу. В первой схеме при отсутствии расхода сила тока будет максимальной. С увеличением расхода сила тока будет уменьшаться, потому что при этом все большее число ионизированных молекул будет уноситься из межэлектродной зоны.



а



в

Рис. 2.35. Схемы ионизационных расходомеров с расположением источника излучения и приемных электродов на противоположных стенках трубы

Во второй схеме – наоборот: при отсутствии расхода и полной симметрии схемы разность ионизационных токов, текущих через приемные электроды, равна нулю. С увеличением расхода число ионизированных молекул, достигающих электрода 2, уменьшается, а достигающих электрода 3 – увеличивается, благодаря чему разность ионизационных токов возрастает.

Ионизационный ток в обеих схемах наряду с зависимостью от скорости или расхода потока зависит и от разности напряжений, приложенных к электродам. С возрастанием напряжения увеличивается скорость перемещения ионов вдоль силовых линий электрического поля.

Расходомеры с ионизацией газа или жидкости электрическим полем

Расходомеры с ионизацией газа или жидкости электрическим полем – это расходомеры у которых в качестве ионизатора выступает электрическое поле.

Ионизация потока газа может происходить под действием электрического разряда. Ионизация диэлектрической жидкости происходит в результате возникновения в ней электрических зарядов под действием внешнего электрического поля.

При ионизации газа электрическим разрядом промежутки между электродами очень мал (несколько миллиметров или даже доли его). Поэтому соответствующие приборы находят применение преимущественно в качестве анемометров для измерения местных скоростей воздуха. Различаются анемометры с тлеющим, дуговым и искровым разрядами.

В конструкции анемометра с тлеющим разрядом расстояние между заточенными на конус концами платиновых электродов диаметром 0,15-0,5 мм равнялось 0,1-0,25 мм. Электроды были припаяны к металлическим стержням, изолированным друг от друга. При столь малом расстоянии между электродами и достаточной величине приложенного к ним напряжения возникает тлеющий разряд, ионизирующий газ. Тлеющий разряд формируется, как правило, при низком давлении газа и малом токе. При увеличении проходящего тока может превращаться в дуговой разряд.

С увеличением скорости газа все большее число ионизированных молекул будет уноситься из зазора между электродами, и ионизационный ток будет уменьшаться. Измеряя силу тока или напряжения на электродах, которое требуется для поддержания постоянной силы тока, можно судить о скорости газа. Для уменьшения шумов на электроды предпочитают подавать переменное напряжение высокой частоты (100 кГц). При очень больших скоростях газа применение анемометров с тлеющим разрядом нецелесообразно, так как требующееся при этом увеличение подводимой мощности может привести к изменению вида разряда.

При больших, в том числе при сверхзвуковых скоростях, применяют анемометры с дуговым разрядом при питающем напряжении весьма высокой частоты для уменьшения шумов. В установке для измерения сверхзвуковых скоростей электроды диаметром 0,7-1 мм были выполнены из молибдена и

вольфрама с примесью молибдена. Зазор в пределах 0,15-0,25 мм, частота 25-30 мГц, погрешность около $\pm 5\%$. При измерении дозвуковых скоростей электроды можно изготавливать из платиновой проволоки диаметром 0,3-0,5 мм. Благодаря весьма малой инерционности анемометры, как с дуговым, так и с тлеющим разрядом пригодны для измерения скоростей, изменяющихся с частотой, равной десяткам килогерц.

На рис. 2.36 показан ионизационный расходомер для жидкостей-диэлектриков. Поток индустриального масла протекает в кольцевом пространстве между наружным трубчатым электродом 6 и цилиндрическим электродом 7, укрепленным вдоль оси потока с помощью изоляционной втулки 8. Электрод 6 заземлен, а к электроду 7 через винт 9 подается высокое (10 кВ) отрицательное напряжение. Под действием электрического поля в жидкости, находящейся в кольцевом пространстве между электродами 6 и 7, возникают отрицательные электрические заряды.

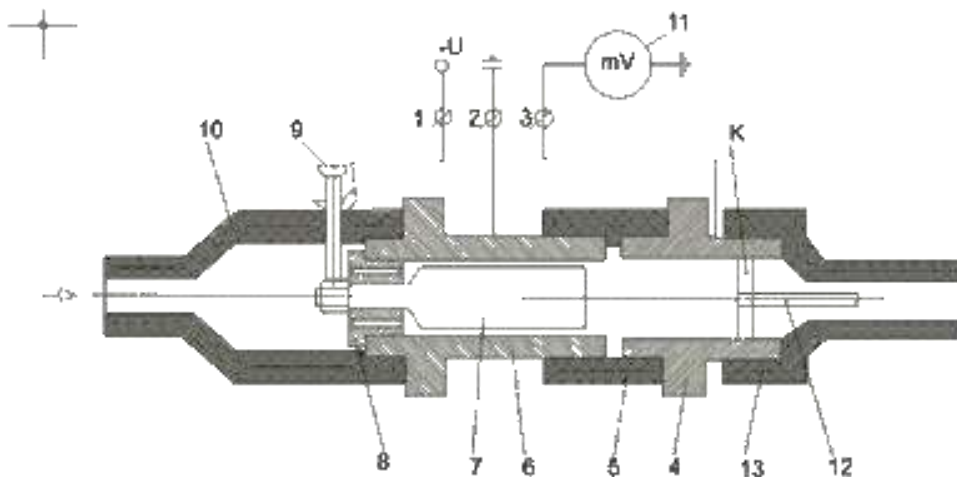


Рис. 2.36. Ионизационный преобразователь для жидкостей-диэлектриков

Чем больше скорость жидкости, тем большее число этих зарядов будет собираться на третьем электроде – коллекторе 4, отделенном от электрода 6 изоляционной втулкой 5, и тем больше будет сила тока, измеряемая микроамперметром 11. Металлическая крестовина К со стержнем 12 дополняет электрод 4, способствуя лучшему сбору всех зарядов из жидкости. С помощью изоляционных втулок 13 и 10 преобразователь расхода монтируется в трубопроводе.

Ионизационные расходомеры имеют большую погрешность ($\pm 5\%$) и поэтому применяются редко. Несколько чаще ионизационный метод находит применение для измерения скоростей воздушных потоков.

Расходомеры с вторичными ионизационными преобразователями

Ионизационные преобразователи, могут также применяются в различного рода расходомерах, например в расходомерах обтекания. Так, в ротаметрах для этой цели в поплавке укрепляют радиоактивный изотоп, предназначенный для преобразования перемещения поплавка в сигнал, измеряемый с помощью сцинтилляционного счетчика, счетчика Гейгера или измерителя силы ионизационного тока. В расходомерах с поворотной лопастью радиоактивный изотоп укрепляется на свободном конце лопасти и преобразует поворот или деформацию лопасти в измерительный сигнал. Так, в одном из расходомеров стальная упругая пластина (длиной 40 мм и толщиной 40-100 мкм) одним концом закреплена в трубе диаметром 50 мм, а на другом свободном конце имеет маленький источник γ -излучения. При перемещении этого конца изменяется интенсивность γ -излучения, достигающая приемника, установленного снаружи трубопровода. В этом случае изменение плотности и состава измеряемого вещества будет влиять на степень поглощения γ -лучей, а значит и на показания прибора.

В турбинных расходомерах иногда применяют ионизационные преобразователи частоты вращения турбинки в частоту импульсов тока. В одну или несколько лопастей запрессовывают радиоактивный изотоп, а снаружи трубы устанавливают приемник, экранированный так, что излучение попадает в него в пределах некоторого угла поворота турбинки.

2.9. КОРИОЛИСОВЫЕ РАСХОДОМЕРЫ

Расходомер, основанный на эффекте Кориолиса (Coriolis). Принцип действия кориолисовых массовых расходомеров основан на изменениях фаз механических колебаний трубок, по которым движется измеряемая среда. Измеряемая среда проходит через U-образную трубку (Рис. 2.37), которая испытывает вибрации, перпендикулярные направлению потока и вызывающие закручивание вещества. Если трубка пуста, колебания приведут к синхронному ускорению всех участков трубки. Если же по трубке перемещается жидкость, на неё из-за воздействия ускорения, вызванного колебательным воздействием, будет также действовать кориолисова сила, направленная в различные стороны для входного и выходного потоков жидкости, что приведёт к сдвигу фазы колебаний трубки (Рис. 2.38).

Действие кориолисовой силы можно наблюдать когда гибкий шланг извивается под напором подаваемой в него воды. Величина фазового рассогласования зависит от массы жидкости, протекающей по трубке в единицу времени.

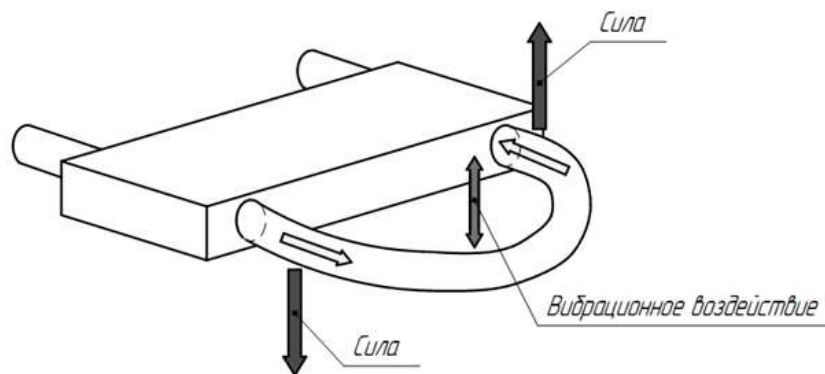


Рис. 2.37. Схема функционирования кориолисовского расходомера

На рис. показано поперечные принудительные колебания труб при отсутствии и при наличии движения жидкости.

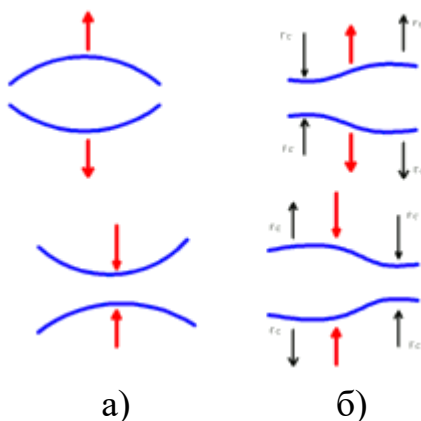


Рис. 2.38. Поперечные принудительные колебания труб
 а – при отсутствии движения жидкости;
 б – при противоположном движении жидкости

На рис. 2.39 представлена одна из конструкций кориолисового расходомера. Основными элементами являются две расходомерные трубки, на которых расположены:

- привод, состоящий из силовой электромагнитной катушки возбуждения и магнит;
- два тензодатчика с магнитами и электромагнитными катушками;
- терморезистор.

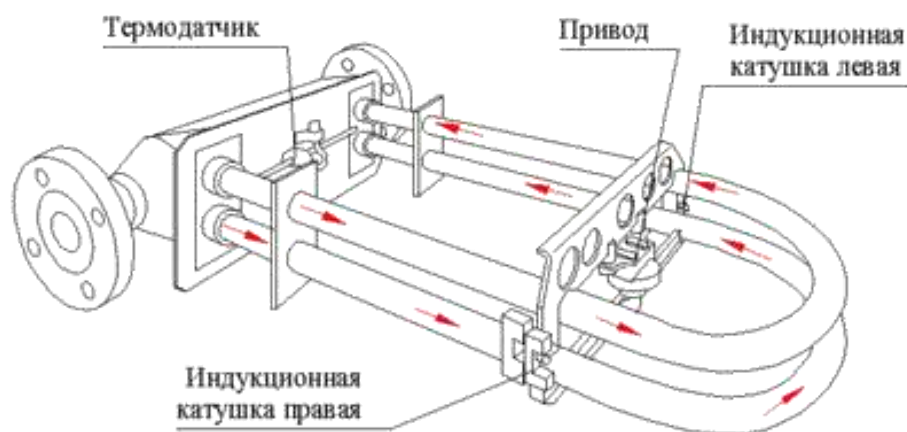


Рис. 2.39. Кориолисовый силовой расходомер

Трубкам посредством силовой катушки сообщается колебательное движение, из-за чего в системе возникает дополнительная сила инерции – сила Кориолиса, которая сопротивляется вибрации расходомерных трубок. Их изгиб фиксируется индукционными датчиками. При одновременном снятии сигналов наблюдается смещение по фазе. Это относительное запаздывание прямо пропорционально массовому расходу.

Резонансная частота трубки зависит от её массы. Общая масса состоит из: массы самой трубки, которая постоянна для данного датчика, и массы измеряемой среды в трубке, которая равна произведению плотности среды и внутреннего объема трубки. Но так как объем трубки – это константа для данного типоразмера датчика, то резонансная частота колебаний трубки может быть привязана к плотности среды и определена путем измерения резонансной частоты колебаний, периода колебаний трубки и температуры. Температура определяется с помощью термосопротивления.

Для расходомеров данного типа не существует требования подвода и отвода жидкости по прямым трубам к расходомеру, чтобы выровнять поток. Прибор должен быть установлен так, чтобы он был постоянно заполнен и чтобы не образовывалось воздушных пробок в системе. Наиболее предпочтительная схема установки является вертикальная с направлением движения потока вверх, но установка в горизонтальных линиях тоже приемлема. Установка в вертикальном положении с направлением движения потока вниз не рекомендуется.

В конструкциях кориолисовых расходомеров вибрация трубопровода не должна создавать помехи измерительному прибору. Если в инструкции по установке упоминаются дополнительные средства, то этот прибор

чувствителен к вибрации, и пульсационные демпферы, гибкие соединения и специальные разъемы, рекомендованные производителем должны быть установлены в надлежащем порядке.

Если существует большая вероятность присутствия пузырьков воздуха в жидкости, то рекомендуется установить воздушный дегазатор перед входом в расходомер. Рекомендуется устанавливать фильтры или воздушные дыхательные клапаны для отвода воздуха или паров, т. е для удаления всех нежелательных вторичных фаз. Обязательным требованием настройки расходомера (установки на нуль) является отсутствие воздуха в системе.

Кориолисовый расходомер имеет ряд достоинств, из которых можно выделить:

- высокую точность;
- повторяемость результатов измерений;
- не требуются прямые участки;
- работают вне зависимости от направления потока;
- нет затрат на установку вычислителей расхода;
- нет необходимости в периодической перекалибровке и регулярном техническом обслуживании;
- могут работать от разных источников питания с помощью самопереключающегося встроенного блока питания;
- надёжная работа при наличии вибрации трубопровода, при изменении температуры и давления рабочей среды;
- длительный срок службы и простота обслуживания благодаря отсутствию движущихся и изнашивающихся частей.

Главным достоинством устройств данного типа является их универсальность – они могут применяться для определения скорости потока большого спектра веществ – как жидкостей, так и газов.

Основным же недостатком кориолисовых расходомеров является их относительно высокая стоимость. Внешний вид *кориолисового расходомера* представлен на рис. 2.40.



Рис. 2.40. Кориолисовый расходомер

2.10. ТУРБОСИЛОВЫЕ РАСХОДОМЕРЫ

Турбосиловыми называют силовые расходомеры, в преобразователе которых в результате силового воздействия, пропорционального массовому расходу, поток закручивается.

На рис. 2.41 показана принципиальная схема турбосилового расходомера при внешнем силовом воздействии. Внутри трубопровода 2 установлен ротор 3 с малым радиальным зазором. Ротор имеет каналы для прохода жидкости, которые разделены перегородками, параллельными его оси (могут быть выполнены в виде прямолопастной крыльчатки). Вращаясь от электродвигателя 1, ротор закручивает жидкость. После чего она приобретает винтовое движение, показанное стрелкой. Далее жидкость поступает на ротор 5, закрепленный на пружине 6, и закручивает её на угол, пропорциональный массовому расходу. Неподвижный диск 4 предназначен для уменьшения вязкостной связи между роторами.

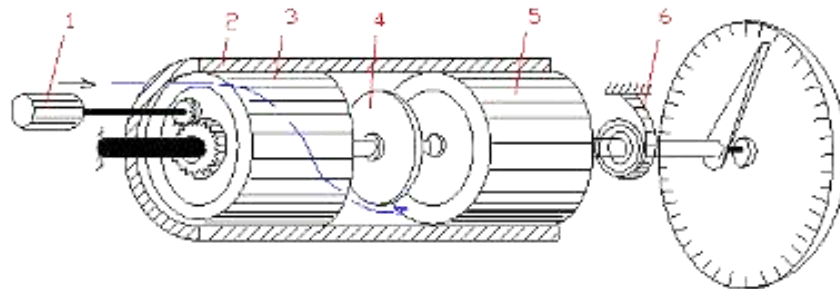


Рис. 2.41. Принципиальная схема турбосилового расходомера

Чтобы исключить появление дополнительной погрешности измерения массового расхода, момент, создаваемый силами вязкостного трения на поверхностях ротора, и от момента, создаваемого силами трения в подшипниках, должны сохранять постоянное значение (или быть компенсированы). Чувствительность расходомера увеличивается с увеличением наружного радиуса каналов роторов или лопастей крыльчаток. Длину лопастей выбирают так, чтобы обеспечить закрутку всех частиц потока, проходящих через ротор при наибольшем измеряемом расходе. Таким образом, длина лопастей должна быть тем больше, чем меньше их число.

Если закручивание потока происходит за счет его потенциальной энергии (т. е. электродвигатель отсутствует) с помощью роторов, имеющих наклонные лопатки, то с увеличением расхода скорость возрастает.

Турбосиловые расходомеры отличаются большей компактностью по сравнению с кориолисовыми, но имеют ограниченное применение, из-за невозможности измерения расхода двухфазных сред, в частности нефтегазовых потоков. Так как при этом возникает опасность расслоения фаз при вращении подвижного элемента преобразователя расхода, что нарушит равномерное их распределение по сечению и изменит величину измеряемого момента. Но для средних и больших расходов турбосиловые расходомеры могут применяться. Максимальные расходы жидкости у них составляют 6-300 т/ч при диаметрах труб 50-200 мм. Их погрешность $\pm (0,5-2) \%$ от предела шкалы. Также существенным достоинством данных расходомеров является возможность измерения различных по величине расходов жидкости и газа.

Контрольные вопросы

1. Как работает расходомер постоянного перепада давления?
2. Как работает расходомер переменного перепада давления?
3. Какой расходомер называется тахометрическим?
4. Каков принцип действия турбинного расходомера?
5. Расскажите о турбинном расходомере с индуктивным преобразователем.
6. Расскажите о турбинном расходомере с индукционным преобразователем.
7. Расскажите о турбинном расходомере с фотоэлектрическим преобразователем.
8. Расскажите о турбинном расходомере с оптическим преобразователем.
9. Какие виды турбинок используются в турбинных расходомерах?
10. Каков принцип действия различных шариковых расходомеров?
11. Чем отличается шариковый расходомер от роторно-шарового?
12. Какие расходомеры относятся к камерным?
13. Охарактеризуйте основные разновидности камерных расходомеров?
14. Какова конструкция лопастного счетчика?
15. Какова конструкция ковшового счетчик?
16. На каком физическом принципе основана работа электромагнитного расходомера?
17. Каковы достоинства и недостатки электромагнитных расходомеров?
18. Какие расходомеры называются ультразвуковыми?

19. Чем отличаются различные конструкции ультразвуковых расходомеров?

20. Как работают вихревые расходомеры?

21. Какие конструкции тепловых расходомеров Вы знаете?

22. Какие разновидности ионизационных расходомеров используются в практике измерений?

23. Каков принцип работы кориолисового расходомера?

24. Каковы особенности турбосилового расходомера?