

АКАДЕМИЯ СТАНДАРТИЗАЦИИ, МЕТРОЛОГИИ И СЕРТИФИКАЦИИ

А.П. Лепявко

**РАСХОДОМЕРЫ И СЧЕТЧИКИ
ЖИДКОСТИ И ГАЗА.
ПОВЕРКА И КАЛИБРОВКА**

Учебное пособие

Москва
2005

Лепяко А.П. Расходомеры и счетчики жидкости и газа. Проверка и калибровка: Учеб. пособие. — М.: АСМС, 2005.

Приведены принципы действия, основные метрологические характеристики расходомеров и счетчиков жидкости и газа, методы их проверки и калибровки. Даны схемы и описание эталонных расходомерных установок.

В настоящее пособие не включены материалы по расходомерам переменного перепада давления, которым посвящено ранее опубликованное пособие «Расходомеры переменного перепада давления».

Учебное пособие соответствует образовательной программе дисциплины «Проверка и калибровка средств теплотехнических измерений».

Учебное пособие предназначено для слушателей Академии стандартизации, метрологии и сертификации, повышающих квалификацию по специализации «Проверка и калибровка средств теплотехнических измерений». Учебное пособие может быть рекомендовано также специалистам в области проверки и калибровки средств измерений расхода и количества.

Учебное пособие рассмотрено на заседании кафедры «Теплотехнические измерения» и рекомендовано к использованию в учебном процессе.

1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

1.1. Основные термины и определения

Расход и количество потоков жидких и газообразных сред измеряют практически во всех областях человеческой деятельности. Расход измеряют прежде всего при технологических операциях, количество — при технологических процессах, связанных с заполнением каких-либо устройств (химических реакторов, топливных баков летательных аппаратов и т.д.), а также при товарном учете различных веществ и энергоносителей.

Расход — количество вещества, протекающее через сечение канала в единицу времени.

В зависимости от того, в каких единицах измеряют количество вещества, различают объемный расход и массовый расход.

Объемный расход Q_o . Единицей объемного расхода в Международной системе единиц СИ является $\text{м}^3/\text{с}$. Часто использование этой единицы оказывается неудобным, поэтому широко используются внесистемные единицы: $\text{м}^3/\text{ч}$, $\text{л}/\text{мин}$, $\text{л}/\text{ч}$ и т.д.

Массовый расход Q_m . Единица массового расхода в системе СИ — $\text{кг}/\text{с}$. Внесистемные единицы — $\text{кг}/\text{мин}$, $\text{т}/\text{ч}$.

$$Q_m = Q_o \rho,$$

где ρ — плотность измеряемой среды в рабочих условиях.

При измерении объемного расхода необходимо указывать рабочие параметры — давление и температуру, так как они оказывают сильное влияние на плотность. Поэтому для газов и паров вводится понятие **объемного расхода, приведенного к стандартным условиям**, Q_c (абсолютное давление $p_c = 101,325 \text{ кПа}$, температура $t_c = 20^\circ\text{C}$), который соответствует такому же массовому расходу, что и объемный расход при рабочих условиях. Единицы измерения те же, что и для объемного расхода, — $\text{м}^3/\text{с}$, $\text{м}^3/\text{ч}$.

Фактически объемный расход, приведенный к стандартным условиям, — это массовый расход с каким-то коэффициентом пропорциональности, определяемым при стандартных условиях.

$$Q_c = \frac{Q_m}{\rho_c} = Q_o \frac{\rho}{\rho_c},$$

где ρ_c — плотность измеряемой среды в стандартных условиях.

Плотность газа в рабочих и стандартных условиях связана уравнением состояния

$$\rho = \rho_c \frac{p}{p_c} \frac{T_c}{T} \frac{1}{K},$$

где p и T — давление и температура измеряемой среды в рабочих условиях;

K — коэффициент сжимаемости.

Расход газа, приведенный к стандартным условиям,

$$Q_c = Q_0 \frac{p}{p_c} \frac{T_c}{T} \frac{1}{K}.$$

Таким образом, объемный расход, приведенный к стандартным условиям, можем быть определен по результатам измерения объемного расхода в рабочих условиях, давления, температуры и состава измеряемой среды.

Строго говоря, и при измерении объемного расхода жидкости необходимо указывать ее параметры или приводить результаты измерения к стандартным условиям. Как правило, этого не делается, так как у большинства жидкостей зависимость плотности от температуры и давления незначительна, и при требованиях нормальной точности измерения расхода и количества можно не учитывать эту зависимость. При требованиях высокой точности измерения, например, при учете нефти и нефтепродуктов, зависимость плотности от температуры необходимо учитывать, а результаты измерения объемного расхода нужно приводить к стандартным условиям.

При учете природного газа принято использовать **объем, приведенный к стандартным условиям**, V_c .

Объем при стандартных условиях V_c содержит такую же массу газа M , что и объем при рабочих условиях V .

$$M = V_c \rho_c = V \rho;$$

$$V_c = V \frac{\rho}{\rho_c}.$$

Ценность природного газа определяется не его массой, а тепловой сгорания. Поэтому учет газа должен производиться с учетом его **теплоты сгорания**. С этой целью введено понятие **расход энергии-содержания (теплоты сгорания)** Q_0 , Q_1 и Q_{10} — Дж/с.

$$Q_0, Q_1, Q_{10}$$

где T_0 — объемная удельная теплота сгорания, Дж/м³.

Расходомер — прибор, служащий для измерения расхода.

Счетчик количества (счетчик) — измерительный прибор, предназначенный для измерения суммарного количества вещества, протекающего через сечение канала за определенный промежуток времени.

Расходомер со счетчиком — измерительный прибор для измерения расхода и количества.

Преобразователь расхода — измерительный преобразователь, непосредственно воспринимающий воздействие потока измеряемой среды и преобразующий расход в величину, удобную для измерения.

Преобразователь расхода часто бывает одинаковым у расходомеров и счетчиков, различие — в той части прибора, которая воспринимает сигнал от преобразователя расхода. Например, турбинный преобразователь расхода используется как в расходомерах, так и в счетчиках. В одном случае прибор регистрирует частоту импульсов, в другом — количество импульсов. Поэтому часто используется обобщенное понятие — **расходоизмерительное устройство**, включающее в себя расходомер, счетчик и преобразователь расхода.

Название расходоизмерительного устройства определяется физическим явлением, на котором основана работа преобразователя расхода, например: расходомер переменного перепада давления, ультразвуковой расходомер.

Приведенные определения расходомера и счетчика отражают измеряемую прибором величину (расход или количество). Однако часто в названии расходоизмерительного устройства учитывается то, с какой величиной (расходом или количеством) связан выходной сигнал преобразователя расхода. Например: расходомер переменного перепада давления — выходной сигнал преобразователя расхода (перепад давления) определяется расходом; электромагнитный расходомер — выходной сигнал преобразователя расхода (ЭДС) пропорционален расходу; счетчик жидкости с овальными шестернями — выходной сигнал преобразователя расхода (число оборотов шестерни) пропорционален объему жидкости.

1.2. Требования к расходоизмерительным устройствам

В зависимости от условий и особенностей эксплуатации к расходоизмерительным устройствам предъявляются самые различные требования. Часть из них предъявляется практически ко всем расходоизмерительным устройствам. К таким требованиям относятся следующие.

Точность измерения. Обычно это требование формулируется как требование высокой точности.

В технологических процессах повышение точности позволяет обеспечить большую эффективность их выполнения, за счет этого улучшать качество продукции и экономить материальные ресурсы. В некоторых случаях при выполнении технологических процессов прежде всего необходима **сходимость** результатов измерений. При товарном учете веществ точность измерения количества должна быть согласована по всему пути продвижения продукта от производителя до конечного потребителя. При этом особенно важна **воспроизводимость** результатов измерений на различных участках этого пути. Реальным путем обеспечения сходимости и воспроизводимости результатов измерений является повышение точности.

Требования к точности расходоизмерительных устройств отражены в нормативных документах.

Общегосударственные поверочные схемы средств измерения расхода предусматривают использование рабочих средств с относительной погрешностью измерения не более 5 %.

Правилами учета тепловой энергии и теплоносителя устанавливаются максимальные значения погрешности: счетчиков воды — не более 2 % в диапазоне расхода от 4 до 100 % от максимального, счетчиков пара — не более 3 % в диапазоне расхода от 10 до 100 %.

Повышение точности, как правило, достигается путем применения более современных и дорогих устройств. При этом удорожается и метрологическое обслуживание этих устройств. Поэтому затраты на повышение точности должны быть экономически обоснованы.

В целом происходит постепенное повышение точности измерения расхода и количества, что определяется усложнением технологических процессов, ужесточением предъявляемых к ним требований и удорожанием природных ресурсов. Несколько десятилетий назад вполне приемлемой считалась погрешность измерения 1,5...2 %. В настоящее время часто требуется выполнять измерения с погрешностью менее 0,5 %.

За рубежом коммерческий учет нефтепродуктов в настоящее время принято проводить с погрешностью не более 0,1 %, оперативный учет — не более 0,5 %. Погрешность измерения расхода газа 1,0 % уже в некоторых случаях считается недопустимо большой. Современные средства учета природного газа имеют погрешность измерения расхода и объема 0,3...0,4 %.

Надежность. Именно надежность часто является определяющим фактором при выборе того или иного типа прибора. Основным показателем надежности является время, в течение которого с заданной вероятностью сохраняются работоспособность и соответствие нормативных метрологических характеристик допускаемым значениям. Надежность зависит от конструкции, условий эксплуатации и определяет значение межповерочного интервала.

Большое влияние на надежность расходоизмерительных устройств оказывает чистота измеряемой среды. В преобразователях расхода с подвижными элементами наличие примесей приводит к повышенному износу пар трения, в преобразователях без подвижных элементов происходит изменение геометрических параметров за счет износа и загрязнения. Для обеспечения надежной работы необходимо устанавливать устройства для очистки измеряемой среды.

Производственные условия применения средств измерений характеризуются наличием внешних электрических и магнитных полей. Поэтому важным фактором, определяющим надежность, является электромагнитная совместимость, особенно для современных микропроцессорных средств измерений.

У средств измерений, используемых при коммерческом учете, необходимо также обеспечить защиту от несанкционированного вмешательства.

Независимость результатов измерения от изменения свойств вещества, прежде всего плотности и вязкости. Как правило, требуется измерять массу и массовый расход (или объем и объемный расход, приведенный к стандартным условиям), а у большинства преобразователей расхода выходной сигнал определяется объемным расходом. Поэтому необходимо предусматривать устройства, автоматически вводящие поправку на изменение плотности.

Вязкость вещества оказывает влияние на результат измерения из-за изменения режима течения в преобразователе расхода и трубопроводе. Для многих приборов для обеспечения требуемой точности измерения необходимо определять функцию влияния вязкости и учитывать поправку к показаниям.

Независимость результатов измерения от структуры потока в трубопроводе. Большинство преобразователей расхода обеспечивают точность лишь в том случае, если распределение скорости в сечении трубопровода сформировано и соответствует режиму течения. Наличие в трубопроводе местных сопротивлений и, следовательно,

деформации потока приводит к значительному увеличению погрешности. Например, показания турбинного расходомера могут измениться на 1...10 % при наличии колена перед преобразователем расхода в зависимости от радиуса колена и расстояния между ним и преобразователем.

Чтобы сформировалось распределение скорости в сечении трубопровода, необходимо предусматривать прямые участки трубопроводов. Чаще всего требуемая длина прямого участка до преобразователя расхода находится в пределах 10...20 диаметров трубопровода, после преобразователя 5...10 диаметров.

Необходимость прямых участков трубопровода может существенно затруднить использование расходоизмерительного устройства, особенно при измерении больших расходов в трубопроводах большого диаметра. В этих случаях преимущество имеют устройства, на погрешность которых малое влияние оказывает структура потока в трубопроводе.

Реальным путем снижения погрешности, вызванной деформацией потока, является градуировка и поверка устройства непосредственно на месте эксплуатации. При этом применяются передвижные эталонные установки или эталонные установки встраиваются непосредственно в технологические линии.

Широкий диапазон измерения необходим в тех случаях, когда расход может изменяться в больших пределах. Кроме того, широкий диапазон измерения каждого устройства позволяет сократить число типовых размеров таких устройств.

Минимальное гидравлическое сопротивление. Гидравлическое сопротивление преобразователя расхода определяет затраты энергии на измерение. При сравнительной оценке приборов следует учитывать не только гидравлическое сопротивление преобразователя расхода, но и сопротивление дополнительных устройств и прямых участков трубопровода, которые необходимо предусматривать при монтаже преобразователя.

Быстродействие. Высокое быстродействие необходимо прежде всего при измерении меняющихся расходов и в системах автоматического регулирования.

Динамические характеристики должны также учитываться при выборе прибора для измерений расхода пульсирующих и переменных потоков. Дополнительная погрешность, вызванная наличием пульсаций, может составить несколько процентов в тех случаях, когда пери-

од пульсаций расхода близок к постоянной времени преобразователя расхода. Эта дополнительная погрешность может оказаться определяющей в суммарной погрешности измерения.

Для снижения погрешности необходимо осуществлять рациональный выбор типа прибора или обеспечивать сглаживание пульсаций расхода путем установки в трубопроводах успокоителей, представляющих комбинацию емкостей и гидравлических сопротивлений. Кроме того, при возможности необходимо градуировать и поверять прибор непосредственно на месте эксплуатации.

Простота контроля метрологических характеристик. Наиболее существенно это требование для устройств, предназначенных для измерения больших расходов. Еталонные расходомерные установки для поверки и калибровки при больших расходах являются громоздкими, сложными и дорогими, что приводит к большим затратам на проведение поверки и калибровки.

Ряд расходоизмерительных устройств может поверяться и калиброваться беспробивным методом (без использования эталонных расходомерных установок). Возможность проведения поверки и калибровки беспробивным методом часто является определяющим фактором при выборе того или иного типа прибора.

1.3. Классификация расходомеров

Создать универсальный тип прибора, основанный на одном физическом явлении, который смог бы охватить все области применения и удовлетворить всем требованиям, невозможно. В настоящее время применяются расходоизмерительные устройства, основанные на самых разных физических принципах, каждый из которых обладает определенными преимуществами и недостатками.

Физический принцип, на котором основана работа расходоизмерительного устройства, отражается в его названии, например: ультразвуковой расходомер, электромагнитный расходомер, расходомер переменного перепада давления.

Все устройства можно разделить на группы исходя из общности одной или нескольких характеристик. В зависимости от целей классификации в ее основу закладывается какой-либо определяющий для этой цели признак.

В зависимости от того, какой расход измеряется — объемный или массовый, устройства подразделяются на **объемные** и **массовые**. В свою очередь массовые расходомеры и счетчики могут иметь пре-

образователи расхода, выходной сигнал которых определяется массовым расходом, и преобразователи, выходной сигнал которых определяется объемным расходом, а массовый расход или количество рассчитываются по результатам измерения объемного расхода и плотности.

В зависимости от состояния измеряемой среды расходомерные устройства подразделяются на **жидкостные** и **газовые**. В свою очередь жидкостные устройства делятся на устройства, предназначенные для измерения высокоскоростных, криогенных жидкостей и жидких металлов.

По значению **максимального измеряемого расхода** жидкостные устройства можно разделить на следующие группы:

- **устройства малой производительности** до $1 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$;
- **устройства средней производительности** от $1 \cdot 10^{-3}$ до $1 \cdot 10^{-1} \text{ м}^3/\text{с}$;
- **устройства большой производительности** свыше $1 \cdot 10^{-1} \text{ м}^3/\text{с}$.

По точности можно выделить:

- **устройства высокой точности** с погрешностью менее 0,5 %;
- **устройства нормальной точности** с погрешностью в пределах от 0,5 до 1,5 %;
- **устройства пониженной точности** с погрешностью от 1,5 до 2,5 %;
- **грубые устройства** с погрешностью более 2,5 %.

Наиболее широко используются приборы нормальной и пониженной точности. Приборами высокой точности являются турбинные счетчики нефти и нефтепродуктов, камерные счетчики промышленных жидкостей, массовые кориолисовые расходомеры, а также современные многолучевые жидкостные и газовые ультразвуковые расходомеры.

В зависимости от **быстродействия** приборы подразделяются на:

- **маломанерционные** приборы с временем установления показаний менее 0,1 с;
- **инерционные** приборы с временем установления показаний более 0,1 с.

Самыми быстродействующими являются электромагнитные преобразователи расхода. К быстродействующим приборам относятся также турбинные расходомеры. Наиболее инерционными являются тепловые и корреляционные преобразователи.

В зависимости от особенностей конструкции преобразователи расхода расходоизмерительные устройства подразделяются на:

— **устройства с подвижными элементами** в потоке измеряемой среды;

— **устройства без подвижных элементов** в потоке измеряемой среды.

К устройствам с подвижными элементами относятся:

- **камерные расходомеры** (лопастные, кольцевые, с овальными шестернями, дисковые, винтовые, мембранные, роторные);
- **расходомеры обтекания** (постоянного перепада давления — ротаметры и поплавковые расходомеры);
- **скоростные расходомеры** (турбинные и шариковые);
- **вибрационные расходомеры** (массовые кориолисовые).

Устройства без подвижных элементов подразделяются на:

- **расходомеры с деформацией потока** (расходомеры переменного перепада давления и вихревые расходомеры);
- **расходомеры без деформации потока** (ультразвуковые, электромагнитные, корреляционные, тепловые, оптические).

В зависимости от метода **контроля метрологических характеристик** расходоизмерительные устройства можно разделить на две группы:

- **устройства**, поверка и калибровка которых возможна только **протипным методом** с использованием эталонных расходомерных установок;
- **устройства**, поверка и калибровка которых могут проводиться **беспротипным методом**.

Беспротипная поверка и калибровка могут проводиться в тех случаях, когда выполняются следующие условия:

- физический процесс, происходящий в преобразователе расхода, хорошо изучен;
- отсутствуют факторы, влияние которых трудно непосредственно проконтролировать;
- разработаны соответствующие методики поверки и калибровки;
- имеются или специально разработаны технические средства поверки и калибровки.

На результат измерения приборов, имеющих в преобразователе расхода подвижные элементы, оказывают влияние протечки через зазоры и неопределенность трения. Поверка и калибровка таких приборов может проводиться только протипным методом.

В приборах с преобразователями расхода без подвижных элементов источников погрешности являются отклонение геометрических параметров преобразователя от номинальных значений, погрешность

измерительных устройств, воспринимающих сигнал от преобразователя расхода, а также погрешность, вызванная недостаточным знанием самого физического процесса в преобразователе расхода. При хорошо изученном процессе в преобразователе расхода контроль метрологических характеристик прибора в целом может проводиться поэлементно и заключаться в контроле геометрических параметров преобразователя расхода и метрологических характеристик промежуточных преобразователей и вторичных приборов.

Для ряда приборов разработаны методики поверки и калибровки беспробивным методом. Такими приборами являются расходомеры переменного перепада давления со стандартными и специальными сужающими устройствами, а также ультразвуковые, электромагнитные, вихревые и корреляционные расходомеры.

1.4. Нормируемые метрологические характеристики расходомеров

Нормирование метрологических характеристик расходоизмерительных устройств осуществляется в соответствии с принципами, изложенными в ГОСТ 8.009-84 «ГСИ. Нормируемые метрологические характеристики средств измерений». Конкретные метрологические характеристики, нормируемые для конкретных типов расходоизмерительных устройств, устанавливаются в соответствующих нормативных документах: государственных стандартах, методиках институтов (МИ), руководящих документах (РД) и технических условиях (ТУ).

Комплекс нормируемых метрологических характеристик средств измерений согласно ГОСТ 8.009-84 включает в себя следующие группы характеристик:

- характеристики, предназначенные для определения результатов измерения (без введения поправок);
- характеристики погрешности;
- характеристики чувствительности к влияющим величинам;
- динамические характеристики;
- характеристики, отражающие взаимодействие с объектом измерения;
- неинформативные параметры выходного сигнала.

К характеристикам, предназначенным для определения результатов измерения, относятся:

- номинальная статическая характеристика преобразования (НСХ);

- диапазон измерения;
- информативный параметр выходного сигнала.

Номинальная статическая характеристика преобразования расходоизмерительного устройства представляется в виде аппроксимирующего уравнения, связывающего расход и информативный параметр выходного сигнала, $Q = f(x)$ или в виде зависимости коэффициента преобразования от расхода $K = f(Q)$.

Аппроксимирующее уравнение $Q = f(x)$ может иметь следующий вид:

$$Q = bx; \quad Q = a + bx; \quad Q = a + bx + cx^2; \quad Q = d\sqrt{x},$$

где Q — расход;

x — информативный параметр выходного сигнала;

a, b, c и d — постоянные коэффициенты.

Коэффициент преобразования определяется как отношение

$K = \frac{x}{V}$ для счетчиков или $K = \frac{x}{Q}$ для расходомеров, где x — информативный параметр выходного сигнала; V — количество вещества, прошедшего через счетчик.

Аппроксимирующее уравнение определяется при градуировке. В протоколах испытаний, паспортах приводятся аппроксимирующее уравнение в общем виде с указанием числовых коэффициентов. Номинальная статическая характеристика преобразования может представляться отдельно для различных поддиапазонов измерения.

Коэффициент преобразования может приниматься постоянным, выражаться в виде зависимости от расхода, которая представляется полиномом первой или второй степени, а также в виде таблицы. При табличном представлении коэффициента преобразования в таблице указываются значения или расчетные формулы коэффициента преобразования для конкретного диапазона расходов.

Диапазон измерения нормируется путем указания нижнего (наименьшего расхода) $Q_{\min}$ и верхнего (наибольшего расхода) $Q_{\max}$ пределов измерения. При разбивке всего диапазона на поддиапазоны указывают также их границы.

Информативный параметр выходного сигнала нормируют путем указания физической величины и границ ее изменения.

При измерении расхода информативным параметром выходного сигнала могут быть: частота следования электрических импульсов, сила тока, напряжение, цифровой код, перепад давления, перемеще-

ние указателя шкалы и т.д., при измерении количества — число оборотов измерительного механизма, количество электрических импульсов, цифровой код, показания роликового или стрелочного указателя количества.

Неинформативные параметры выходного сигнала нормируют путем указания параметра и границ его изменения. К неинформативным параметрам относятся: амплитуда колебаний указателя шкалы; уровень шума в выходном сигнале напряжения или тока; в том случае, если выходным параметром являются электрические импульсы, — форма импульса и амплитуда напряжения и т.д.

Характеристики погрешности. Основная погрешность большинства расходоизмерительных устройств нормируется **пределом допускаемой основной погрешности** без разделения на систематическую и случайную составляющие. У некоторых устройств, например ротаметров, нормируется также и вариация показаний.

У расходомеров нормируют предел основной допускаемой относительной δ или приведенной γ погрешности. При нормировании приведенной погрешности за нормирующее значение принимают верхний предел измерения $Q_{\max}$.

$$\delta = \frac{\Delta}{Q} 100; \gamma = \frac{\Delta}{Q_{\max}} 100,$$

где Δ — абсолютная погрешность.

У счетчиков всегда нормируют предел допускаемой относительной погрешности δ измерения количества V :

$$\delta = \frac{\Delta}{V} 100.$$

Допускаемые значения погрешности могут быть разными для различных поддиапазонов измерения.

Расходоизмерительным устройствам могут присваиваться классы точности. При этом класс точности численно равен пределу допускаемой основной относительной или приведенной погрешности.

У некоторых устройств зависимость абсолютной допускаемой погрешности Δ от расхода выражается уравнением

$$\Delta = \Delta_0 + \frac{\delta^*}{100} Q,$$

где Δ_0 — нестабильность нуля;

δ^* — «погрешность», включающая в себя нелинейность (систематическую погрешность), повторяемость (случайную погрешность) и гистерезис (вариацию).

Нестабильность нуля представляется в абсолютных единицах или в процентах от наибольшего или номинального расхода.

Основная погрешность может быть представлена в виде суммы систематической и случайной составляющих. В этом случае нормируют **предел систематической составляющей погрешности** и **предел среднеквадратической погрешности**. При этом они также характеризуются приведенными γ_c и σ_γ или относительными δ_c и σ_δ значениями.

Чувствительность расходоизмерительных устройств к изменению влияющих величин нормируют раздельно для каждой влияющей величины. Она может характеризоваться **дополнительной погрешностью** или **функцией влияния**. Чаще нормируется предел дополнительной погрешности. Функцию влияния нормируют, как правило, у высокоточных устройств, так как в этих случаях изменение результата измерения при изменении влияющей величины может значительно превышать основную погрешность. В современных средствах измерения функция влияния определяется экспериментально при градуировке и учитывается вычислительным устройством при определении результата измерения.

Динамические характеристики. Нормируют время установления показаний или постоянную времени.

Взаимодействие расходоизмерительного устройства с объектом измерения. Нормируются воздействие преобразователя расхода на поток и требуемые длины прямых участков трубопровода до и после преобразователя расхода в зависимости от типа местных сопротивлений.

Воздействие преобразователя расхода на поток нормируется указанием гидравлического сопротивления Δp преобразователя при каком-либо характерном расходе, чаще всего наибольшем, или приводятся зависимости гидравлического сопротивления от расхода $\Delta p = f(Q)$ или от числа Рейнольдса, характеризующего режим течения измеряемой среды, $\Delta p = f(Re)$.

Метрологическая надежность. Нормируют межповерочный интервал, зависящий от режима работы и значения допускаемой погрешности измерения. У некоторых средств измерения нормируется стабильность. Указывается увеличение погрешности в зависимости от времени и условий эксплуатации.

2. ОСНОВНЫЕ ТИПЫ РАСХОДОИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ

В практике измерения расхода и количества используется большое число самых разнообразных типов расходоизмерительных устройств, что определяется специфичностью требований, предъявляемых к ним в каждом конкретном случае. Ниже приводится краткое описание принципов действия устройств, которые наиболее широко применяются.

2.1. Камерные счетчики жидкости

Камерными называются счетчики и расходомеры, подвижные элементы которых приходят в движение (непрерывное или периодическое) под действием перепада давления (непрерывное или периодическое) и при этом отмеривают определенные объемы измеряемой среды. Среди камерных счетчиков жидкости наиболее широко применяются **счетчики жидкости с овальными шестернями и винтовые счетчики**.

Схематично счетчик жидкости с овальными шестернями изображен на рисунке 1. Он состоит из двух находящихся в зацеплении овальных шестерен и корпуса. Шестерни вращаются под действием перепада давлений на входе и выходе счетчика. За каждый оборот шестерни через счетчик проходит четыре измерительных объема. Вращение одной из шестерен передается счетному механизму.

Погрешность счетчика определяется протечками через зазоры между зубьями шестерен и образующей измерительной камеры, а также между стенками камеры и торцами шестерен. Для уменьшения протечек эти зазоры должны быть минимальными. Попадание твердых частиц приводит к повышенному износу и заклиниванию. Поэтому перед поступлением в счетчик жидкость должна быть тщательно отфильтрована.

В отличие от турбинных преобразователей влияние вязкости на результат измерения невелико. Счетчики с овальными шестернями при-

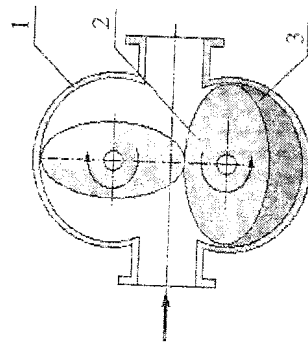


Рис. 1. Счетчик жидкости с овальными шестернями: 1 — корпус; 2 — шестерня; 3 — измерительный объем

меняются для измерения количества жидкостей, имеющих вязкость от 0,55 до 300 сСт ($10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$) и температуру от -40 до $+120^\circ\text{C}$. При увеличении вязкости уменьшаются протечки через зазоры, но увеличивается сопротивление вращению шестерен. Поэтому с увеличением вязкости снижаются значения наибольшего расхода, но благодаря сокращению протечек уменьшается и наименьший расход. При этом относительный диапазон измерения $Q_{\text{наиб}} : Q_{\text{наим}}$ увеличивается.

Выпускаются счетчики жидкости с овальными шестернями с наибольшим расходом до $40 \text{ м}^3/\text{ч}$. При больших расходах (до $420 \text{ м}^3/\text{ч}$) применяются винтовые счетчики.

Класс точности винтовых счетчиков и счетчиков с овальными шестернями 0,25 и 0,5. Если счетчик снабжен не только счетным механизмом, но и тахометром, измеряющим частоту вращения шестерен, то наряду с объемом жидкости будет измеряться и объемный расход жидкости.

В соответствии с ГОСТ 28066-89 для камерных счетчиков жидкости устанавливаются следующие характерные расходы:

номинальный расход $Q_{\text{ном}}$ — расход, при котором счетчик работает непрерывно неограниченное время;

наименьший $Q_{\text{наим}}$ и наибольший расход $Q_{\text{наиб}}$ — предельные значения, при которых выдерживаются требуемая точность и допустимая потеря давления.

При расходах, превышающих $Q_{\text{ном}}$, время работы счетчика ограничивается: в диапазоне $Q_{\text{ном}} < Q \leq 1,3Q_{\text{ном}}$ допускается работа не более 5 часов в сутки; в диапазоне $1,3Q_{\text{ном}} < Q \leq 1,5Q_{\text{ном}}$ — не более 2 часов в сутки.

2.2. Мембранные счетчики газа

Мембранные счетчики газа (другие названия: диафрагменные, сиффонные, с измерительными мехами) были самыми первыми промышленными устройствами для измерения объема газа. Их конструкция запатентована в Англии в 1844 году. Они и в настоящее время являются основными приборами учета потребления природного газа населением.

Измерительные камеры (две или четыре), разделенные диафрагмами, периодически заполняются газом и опустошаются. Движение диафрагм передается через коленчатый вал на клапаны, которые управляют процессами заполнения. Роликовый счетный механизм суммирует число процессов и измеренный рабочий объем. Схематично счетчик с двумя измерительными камерами приведен на рисунке 2.

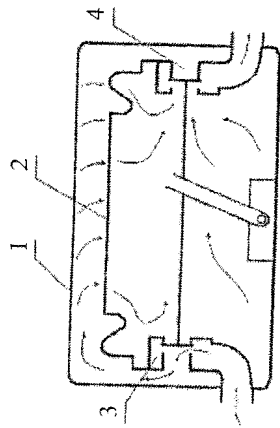


Рис. 2. Принцип действия мембранного счетчика:
1 — корпус; 2 — мембрана (диафрагма);
3, 4 — газораспределительные камеры

Для обеспечения точности измерения требуется полная герметичность и большая скорость срабатывания клапанов газораспределительного устройства.

Особое преимущество диафрагменных счетчиков — большой межповерочный интервал (5, 8 или 10 лет) и большой диапазон измерений (для некоторых счетчиков он достигает 1:160).

Мембранные счетчики подразделяются на бытовые (до $10 \text{ м}^3/\text{ч}$), коммерческие (до $40 \text{ м}^3/\text{ч}$) и промышленные (до $250 \text{ м}^3/\text{ч}$). Допускаемая основная погрешность для большинства счетчиков 1,5 %, при малых расходах (менее 10 % от номинального) 3 %.

Количество потребляемого природного газа должно учитываться в объеме, приведенном к стандартным условиям (температура 20°C). Однако большинство бытовых мембранных счетчиков не имеют устройства компенсации температуры измеряемого газа, что приводит к значительной дополнительной погрешности измерения. Например, при температуре измеряемого газа 5°C возникает отрицательная погрешность примерно 5 %. В современных конструкциях счетчиков имеется механическое устройство компенсации температуры измеряемого газа.

2.3. Ротационные счетчики газа

Основными элементами ротационного счетчика (рис. 3) являются два ротора 2 и корпус 1. Под действием разницы давлений на входе и выходе счетчика роторы приходят во вращение. Для синхронизации вращения на валах роторов установлены шестерни. Передача вращения к редуктору и счетному механизму осуществляется с помощью магнитной муфты. За один оборот ротора через счетчик проходит четыре измерительных объема 3.

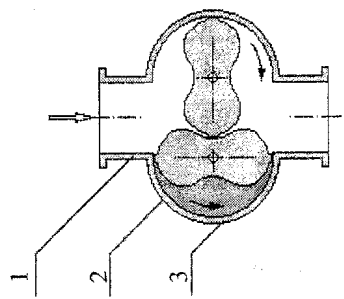


Рис. 3. Ротационный счетчик газа:
1 — корпус; 2 — ротор;
3 — измерительный объем

Погрешность измерения определяется протечками между роторами и между роторами и корпусом. Снижение протечек обеспечивается тщательным изготовлением с малыми зазорами между роторами и между роторами и корпусом счетчика, а также малыми перепадами давления на счетчике при незначительном моменте сопротивления вращению роторов, устанавливаемых на подшипниках качения.

Монтаж роторных счетчиков предпочтительно проводить в вертикальных трубопроводах. Монтаж в горизонтальных трубопроводах допустим, если газ очищен или используется фильтр.

Недостатком ротационных счетчиков газа является неравномерность перемещения газа в пределах одного оборота, приводящая к возникновению пульсаций расхода и давления в газовых трубопроводах.

Ротационные счетчики применяются при расходах газа $Q_{\text{ном}}$ равных 4 (бытовые)...1000 $\text{м}^3/\text{ч}$ (иногда до $2500 \text{ м}^3/\text{ч}$). Давление газа до 6 или 100 бар (бытовые до 10 или 20 кПа). Диаметр составляет 20...200 мм.

Основная погрешность ротационных счетчиков газа $1,0...1,5\%$ при $Q = 0,2...1,0 Q_{\text{ном}}$ и $2...3\%$ при $Q = 0,1...0,2 Q_{\text{ном}}$.

Как правило, при низких давлениях (до 4 бар) ротационные счетчики не требуют при установке наличия прямых участков трубопровода. При более высоких давлениях обычно бывает достаточно предусмотреть прямые участки, равные 4 диаметрам до и 2 диаметрам после него.

2.4. Турбинные расходомеры и счетчики

В турбинном преобразователе расхода измеряемая среда приводит во вращение турбинку. Частота вращения определяется расходом. В расходомере измеряется частота вращения турбинки, в счетчике — общее число оборотов.

Счетчики воды, в которых вал турбинки связан через зубчатый редуктор со счетным механизмом, давно получили широкое распространение. В таких преобразователях для приведения в действие

счетного механизма турбинка при вращении должна преодолевать значительный момент сопротивления. Это не позволяет обеспечить высокую точность измерения. В современных расходомерах и счетчиках вращение турбинки преобразуется в частоту электрических импульсов, пропорциональную скорости вращения (рис. 4).

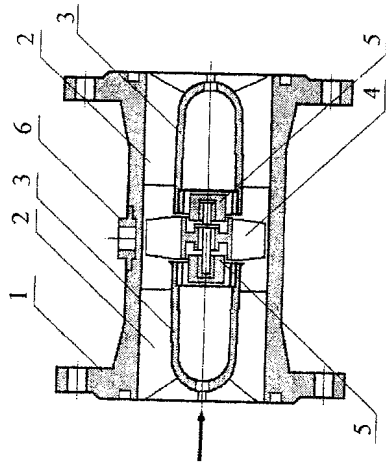


Рис. 4. Турбинный преобразователь расхода:
1 — корпус; 2 — струевыпрямитель; 3 — обтекатель;
4 — турбинка; 5 — подшипник;
6 — фланец для установки индукционного преобразователя

Измеряемая среда проходит через струевыпрямитель, приводит во вращение турбинку (лопасти турбинки выполняются из ферромагнитного материала). При прохождении магнитной лопасти в катушке преобразователя наводится ЭДС (в индукционных преобразователях) или модулируется по амплитуде высокочастотный сигнал (в индуктивных преобразователях). Частота электрических импульсов пропорциональна частоте вращения турбинки.

Необходимость в струевыпрямителе и обтекателе вызвана тем, что на частоту вращения турбинки большое влияние оказывает деформация потока, вызываемая местными сопротивлениями в трубопроводе. Наибольшее влияние оказывают закрутка потока и одностронняя неравномерность распределения осевой скорости. Закрутка потока подавляется радиальными лопастями струевыпрямителя. Главное уменьшение площади проходного сечения за счет соответствующей формы обтекателя обеспечивает выравнивание осевой скорости и снижение крупномасштабных турбулентных возмущений в потоке.

Однако полностью исключить влияние возмущений в трубопроводе за счет установки струевыпрямителя невозможно. Поэтому при монтаже турбинного преобразователя расхода необходимо предусматривать прямые участки трубопровода до и после преобразователя для стабилизации течения измеряемой среды. При требуемой погрешности измерения 0,5...1,0 % длина прямых участков трубопровода обычно составляет 10 диаметров до и 5 диаметров после преобразователя. Для сокращения длины прямых участков перед преобразователем может быть установлен струевыпрямитель.

В идеальном случае, когда на турбинку не действуют моменты сопротивления, скорость ее вращения и частота электрических импульсов f_0 пропорциональны расходу:

$$f_0 = K_0 Q_0,$$

где K_0 — коэффициент пропорциональности.

В действительности на турбинку при ее вращении действуют моменты сопротивления:

- момент трения в подшипниках;
- момент трения, создаваемый измеряемой средой на цилиндрической части турбинки и в зазоре между турбинкой и корпусом;
- момент, создаваемый счетным устройством.

За счет этого скорость вращения турбинки и частота импульсов f отличаются от идеальных. Это отличие оценивается коэффициентом скольжения S

$$S = \frac{f_0 - f}{f_0}.$$

Реальная частота электрических импульсов f определяется следующим образом:

$$f = (1 - S)f_0 = (1 - S)K_0 Q_0 = K Q_0,$$

где K — коэффициент преобразования.

На рисунке 5 приведена зависимость коэффициента преобразования K от расхода, выраженного в процентах от максимального значения. Коэффициент преобразования

$$K = \frac{f}{Q_0} = \frac{n}{V},$$

где f — частота электрических импульсов;

n — количество электрических импульсов;
 Q_0 — объемный расход;
 V — объем измеряемой среды, прошедшей через преобразователь.

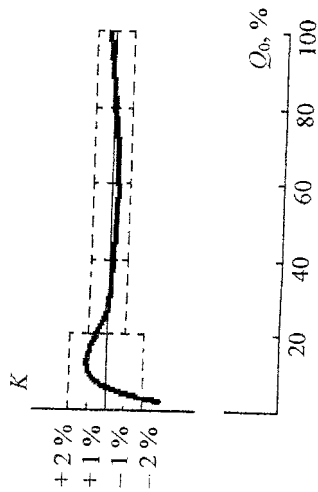


Рис. 5. Зависимость коэффициента преобразования от расхода

Для турбинных расходомеров и счетчиков, имеющих погрешность 0,5...1,0 % и более, номинальная статическая характеристика преобразования представляется в виде $K = \text{const}$. В этом случае отклонение коэффициента преобразования от постоянного значения является относительной погрешностью измерения. У расходомеров и счетчиков с погрешностью менее 0,5 % учитывается зависимость коэффициента преобразования от расхода.

На работу турбинного преобразователя сильное влияние оказывает вязкость измеряемой среды. Возможны три режима течения в проточной части турбинки: ламинарный, переходный и турбулентный (автомодельный). В области ламинарного режима (при малых расходах) коэффициент преобразования возрастает с увеличением расхода (см. рис. 5). В автомодельной области коэффициент преобразования постоянен (в пределах 0,5 %). При переходном режиме на графике зависимости коэффициента преобразования от расхода наблюдается характерный «горб». При увеличении вязкости происходит смещение «горба» в сторону больших расходов и изменяется значение K в автомодельной области. Поэтому при точных измерениях необходимо учитывать функцию влияния вязкости.

Большое значение для стабильности коэффициента преобразования и длительного срока службы преобразователя имеет надежная работа опор турбинки. Условия их работы достаточно тяжелые. Частота вращения турбинки доходит до нескольких сотен в секунду,

и в большинстве конструкций отсутствует специальная подача смазки к подшипникам. Поэтому желательна смазывающая способность измеряемой среды. У газов эта способность полностью отсутствует. Для обеспечения длительного срока службы газовых турбинных преобразователей необходимо предусматривать принудительную смазку подшипников.

Постепенное изнашивание подшипников приводит к изменению трения, момента сопротивления вращению и коэффициента преобразования. Наличие примесей приводит к выходу подшипников из строя. Кроме того, при длительной эксплуатации и наличии абразивных частиц в потоке может происходить изменение геометрии проточной части преобразователя — струевыпрямителя и лопаток турбинки. Поэтому механические примеси в потоке измеряемой среды недопустимы.

Турбинные преобразователи являются одним из наиболее точных средств измерения расхода и количества. Наборы турбинных расходомеров входят в состав государственных поверочных схем в качестве вторичных эталонов. Среднеквадратические отклонения результатов поверки вторичных эталонов не превышают 0,03...0,05 %.

Рабочие турбинные преобразователи расхода обеспечивают возможность измерения расхода и количества жидкости с погрешностью, не превышающей 0,5...1 %, газа 1 %. Чтобы выполнить измерения с более высокой точностью, необходимо учитывать нелинейность зависимости коэффициента преобразования от расхода. Кроме того, градуировка должна проводиться на реальной измеряемой среде и при реальных условиях эксплуатации. При выполнении этих условий погрешность измерения рабочих турбинных счетчиков нефти и нефтепродуктов составляет 0,1; 0,15 и 0,25 %.

Выпускаются жидкостные турбинные преобразователи расхода диаметром 4...600 мм, наибольший расход Q_{max} составляет 0,04...10 000 м³/ч.

Турбинные преобразователи расхода широко используются для измерения расхода и количества газа. Конструкция турбинного счетчика газа приведена на рисунке 6.

Конструкции турбинных преобразователей расхода газа и жидкости близки. Для приведения результата измерения к стандартным условиям необходимо дополнительно измерять давление и температуру газа. Измерение давления и температуры может происходить в трубопроводе или непосредственно в самом преобразователе расхода, как показано на рисунке 6.

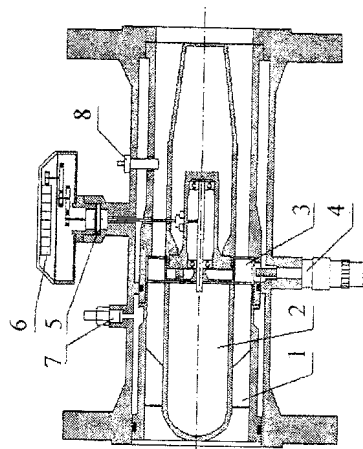


Рис. 6. Турбинный счетчик газа.

- 1 — струевыпрямитель; 2 — обтекатель; 3 — турбинка;
4 — датчик импульсов; 5 — магнитная муфта; 6 — счетный механизм;
7 — отбор давления; 8 — термопреобразователь сопротивления

Кроме того, при изменении параметров газа изменяется зависимость коэффициента преобразования от расхода. При изменении давления и температуры газа изменяются плотность и вязкость. С ростом давления увеличивается плотность и уменьшается вязкость. За счет этого расширяется диапазон измерения, и зависимость коэффициента преобразования становится более пологой.

Поверка счетчиков проводится на воздухе при низком давлении. Плотность и динамическая вязкость природного газа воздуха при одинаковом давлении почти в 2 раза меньше, чем у воздуха. Таким образом, значения коэффициента преобразования и погрешности при реальной эксплуатации будут отличаться от результатов, полученных при поверке. При работе на относительно низких давлениях газ (до 6...10 бар) изменение коэффициента преобразования не превышает нескольких десятых процента. Считается, что при допустимой погрешности 1,0 % этими различиями можно пренебречь. Для повышения точности, особенно при больших давлениях газа, необходимо проводить градуировку и поверку при условиях, близких к условиям эксплуатации.

Применяются газовые турбинные счетчики диаметром 50...600 мм, измеряемый расход 5...25 000 м³/ч. Динамический диапазон измерения для большинства моделей 10:1 или 20:1. Погрешность 1 и 1,5 % в диапазоне 20...100 % $Q_{\max}$, 2 и 2,5 % в диапазоне 10...20 % $Q_{\max}$, 4 % в диапазоне 5...10 % $Q_{\max}$. У некоторых моде-

лей динамический диапазон измерения 30:1, погрешность 1 %, в ограниченном диапазоне 0,5 %.

Для учета количества воды уже много лет широко применяются счетчики, турбинка которых через шестеренчатый редуктор связана со счетным механизмом. Такие счетчики выполняются с тангенциальной турбинкой (они называются крыльчатками) по ГОСТ 14167-83 (диаметр условного прохода $D_y = 10...50$ мм, номинальный расход $Q_{\text{ном}} = 1,0...15$ м³/ч) и с аксиальной турбинкой по ГОСТ 6019-83 ($D_y = 50...250$ мм, $Q_{\text{ном}} = 35...500$ м³/ч).

Устройство счетчика воды с аксиальной турбинкой показано на рисунке 7.

Поток жидкости выравнивается в струевыпрямителе и направляется на лопасти турбинки. Вращение турбинки через червячную пару и передаточный механизм передается счетному устройству. Счетное устройство имеет указатель с делениями, оцифрованными в литрах и кубических метрах. Возможность отсчета непосредственно в единицах объема обеспечивается регулировкой передаточного числа, подбором сменных шестерен и регулировкой скорости вращения турбинки. Для этого одна из радиальных лопастей струевыпрямителя выполняется поворотной относительно направления потока. Поворотом лопасти изменяется угол поступления части жидкости на турбинку таким образом, чтобы погрешность измерения находилась в допустимых пределах.

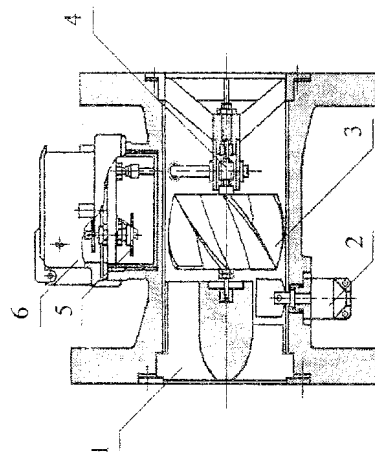


Рис. 7. Счетчик с аксиальной турбинкой.

- 1 — струевыпрямитель; 2 — регулировочное устройство;
3 — турбинка; 4 — червячная пара; 5 — передаточный механизм;
6 — счетное устройство

Устройство счетчиков с тангенциальной турбинкой изображено на рис. 8, 9 и 10. Они выполняются одноструйными и многоструйными.

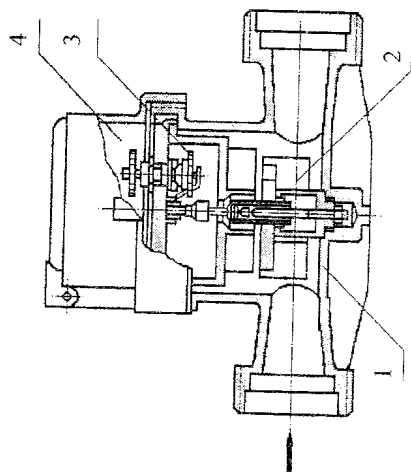


Рис. 8. Счетчик с тангенциальной турбинкой:
1 — корпус; 2 — турбинка; 3 — передаточный механизм;
4 — счетное устройство

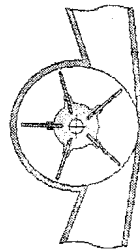


Рис. 9. Турбинка одноструйного счетчика

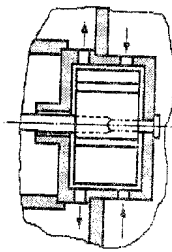


Рис. 10. Камера многоструйного счетчика

Одноструйные счетчики более просты по конструкции и имеют меньшие потери давления. Но они менее надежны в работе вследствие одностороннего износа опор.

Для счетчиков воды установлены следующие характерные расходы:

- наибольший расход $Q_{\max}$ — наибольший расход, при котором счетчик может работать кратковременно, не более 1 часа в сутки;
- номинальный расход $Q_{\text{ном}}$ — расход, при котором счетчик может работать непрерывно (круглосуточно), равный половине максимального;
- переходный расход Q_p — расход, при котором допускаемая погрешность счетчика равна $\pm 2\%$, а при меньшем расходе $\pm 5\%$;

— наименьший расход $Q_{\min}$ — наименьший расход, при котором допускаемая погрешность счетчика равна $\pm 5\%$ и ниже которого погрешность не нормируется;

— порог чувствительности Q_q — минимальный расход, при котором турбинка приходит в непрерывное движение.

При расходах менее Q_q турбинка неподвижна.

2.5. Шариковые расходомеры

В шариковых преобразователях подвижный элемент — шарик — непрерывно движется по кругу. Это движение обеспечивается или винтовым направляющим аппаратом, или тангенциальным подводом измеряемой среды. Более широко применяются преобразователи с винтовым направляющим аппаратом (рис. 11).

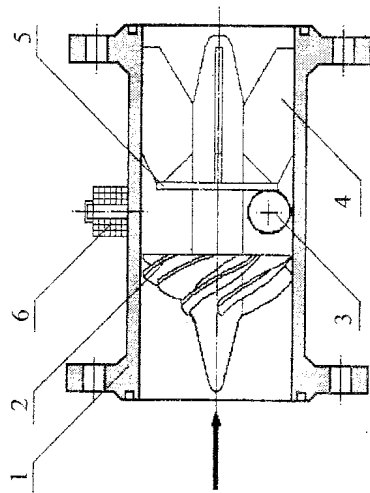


Рис. 11. Шариковый преобразователь расхода:
1 — корпус; 2 — винтовой направляющий аппарат; 3 — шарик;
4 — струевыпрямитель; 5 — ограничительное кольцо;
6 — индукционный преобразователь

Закрученный поток приводит шарик в круговое движение по внутренней поверхности корпуса. Шарик имеет вставку из магнитного материала. Частота вращения шарика преобразуется в электрический частотный сигнал индукционным или индуктивным преобразователем.

Выпускаются шариковые преобразователи расхода с $D_y = 32 \dots 150$ мм, наибольший измеряемый расход $Q_{\max} = 4 \dots 400$ м³/ч. Основное достоинство шариковых преобразователей по сравнению

с турбинными — возможность измерения загрязненных жидкостей с твердыми включениями, связанная с отсутствием подшипников и простой конструкции. Однако погрешность у них больше (приведенная погрешность 1,0...1,5 %), а диапазон измерения уже. Показания сильно зависят от вязкости жидкости. При изнашивании шарика и дорожки качения изменяется коэффициент преобразования.

2.6. Ротаметры

Ротаметры являются расходомерами обтекания. В расходомерах обтекания чувствительный элемент воспринимает динамическое давление потока и перемещается под его воздействием. Кроме них, к этому типу преобразователей расхода относятся поплавковые и поршневые расходомеры, а также расходомеры с поворотной лопастью. Наиболее широко применяются среди расходомеров этого типа ротаметры. Поплавковые и поршневые расходомеры часто называют также ротаметрами с дистанционным выходным сигналом.

Принципиальная схема ротаметра приведена на рисунке 12. Основными элементами ротаметра являются коническая трубка, расширяющаяся кверху по ходу потока, и находящийся в трубке поплавок. Измеряемая среда течет в трубке снизу вверх. Поплавок под воздействием измеряемой среды поднимается. Высота подъема поплавка зависит от расхода.

Рис. 12. Принципиальная

схема ротаметра:
1 — коническая трубка;
2 — поплавок

На поплавок действуют снизу вверх:
— сила гидродинамического давления F ;
— выталкивающая сила Архимеда A .

Действие этих сил уравновешивается весом поплавка G

$$G - A = F;$$

$$V_{\text{п}}(\rho_{\text{п}} - \rho)g = C_{\text{п}}f_{\text{п}}\rho \frac{v^2}{2},$$

где $V_{\text{п}}$ — объем поплавка;

$\rho_{\text{п}}$ — плотность материала поплавка;

ρ — плотность измеряемой среды;

λ — ускорение свободного падения;
 $C_{\text{п}}$ — коэффициент гидродинамического сопротивления поплавка;
 $f_{\text{п}}$ — площадь поперечного сечения поплавка;
 v — скорость измеряемой среды в кольцевом зазоре между поплавком и трубкой.

Скорость в кольцевом зазоре

$$v = \frac{Q_0}{f_{\text{к}}},$$

где Q_0 — объемный расход;

$f_{\text{к}}$ — площадь кольцевого зазора между поплавком и трубкой.

Отсюда

$$Q_0 = \alpha_{\text{р}} f_{\text{к}} \sqrt{\frac{2gV_{\text{п}}(\rho_{\text{п}} - \rho)}{f_{\text{п}}\rho}},$$

где $\alpha_{\text{р}} = \sqrt{C_{\text{п}}}$ — коэффициент расхода ротаметра.

Площадь кольцевой щели в конической трубке зависит от высоты подъема поплавка h . Таким образом, при увеличении расхода поплавок будет подниматься по трубке до установления положения равновесия. Положение поплавка по высоте трубки определяется расходом:

$$h = f(Q_0).$$

Вес поплавка G и архимедова сила A постоянны, поэтому и перепад давления на поплавке, т. е. разность давлений измеряемой среды (снизу) и после (сверху), остается постоянным. Это является основанием для принятия термина «расходомер постоянного перепада давления».

Чтобы исключить опрокидывание поплавка и трение между поплавком и трубкой, нужно обеспечить устойчивое положение поплавка по центру трубки. Кроме того, необходимо уменьшить его колебания в вертикальном направлении. Первоначально для этого на боковой поверхности поплавка наносились косые канавки, вызывавшие вращение поплавка, которое нашло отражение в названии «ротаметр». В дальнейшем выяснилось, что во вращении нет необходимости, и канавки на поплавке не делают.

Коническая трубка обычно выполняется из стекла. На наружной поверхности трубки наносится условная шкала. При градуировке ротаметра определяется положение поплавка относительно шкалы в зависимости от расхода. Эта зависимость близка к линейной.

Коэффициент расхода ротаметра α_r зависит от формы поплавка, геометрических размеров поплавка и трубки, высоты подъема поплавка и свойств измеряемой среды. Поэтому каждый ротаметр на заводе-изготовителе градуируется на воде (жидкостные ротаметры) или на воздухе (газовые ротаметры). При использовании ротаметра для измерения расхода других сред необходимо произвести градуировку на реальной рабочей среде либо пересчитать градуировочную характеристику.

Отечественные ротаметры выпускаются с $D_y = 4...40$ мм. Наибольшие значения расхода $Q_{\max}$ жидкости (по воде) $0,0025...2,5$ м³/ч, газа (по воздуху) $0,063...40$ м³/ч. Наименьший расход $Q_{\min}$ не более 20 % от максимального. Допускаемая приведенная погрешность ± 4 % ($D_y = 4$ мм) и $\pm 2,5$ % ($D_y \geq 6$ мм).

При монтаже ротаметров необходимо обеспечить строго вертикальное положение конусной трубки. Даже при сравнительно небольшом наклоне оси трубки к вертикали возникает дополнительная погрешность измерения расхода. При наклоне происходит уменьшение силы, уравновешивающей действие потока на поплавок, и нарушаются условия обтекания поплавка.

Достоинствами ротаметров являются простота и возможность измерения малых расходов, недостатками — низкая точность и необходимость градуировки на реальных измеряемых средах. В силу этого применение ротаметров ограничено. Ротаметры без индивидуальной градуировки или при градуировке на воде или воздухе часто используются как устройства индикаторного типа для контроля расхода и качества расхода и качественной характеристики изменения расхода.

Принцип действия поплавковых расходомеров такой же, как и у ротаметров. От них поплавковые расходомеры отличаются лишь конструктивно: нет стекляннной трубки, ход поплавка небольшой (в пределах 40...70 мм) и внешняя форма другая. Поплавок у этих приборов жестко связан со стержнем, имеющим магнитный сердечник или магнит для дистанционной передачи сигнала.

Выпускаются жидкостные поплавковые расходомеры РЭ с электрической передачей сигнала и РП с пневматической передачей сигнала. РЭ имеют условный диаметр $D_y = 6...100$ мм, наибольший расход $Q_{\max} = 0,025...16$ м³/ч, РП имеют $D_y = 15...100$ мм, наибольший расход $Q_{\max} = 0,16-16,0$ м³/ч. Приведенная погрешность $\pm 2,5$ %.

В поршневых расходомерах роль поплавка выполняет поршень, перемещающийся во втулке с окнами особой формы. Измеряемая среда поступает под поршень, приподнимает его и выходит через окно. Чем больше расход, тем выше поднимается поршень, открывая большую часть выходного окна во втулке. Перепад давления на поршне остается постоянным.

За рубежом выпускаются ротаметры и поплавковые расходомеры классов точности 4; 2,5; 1,6 и 1, градуируемые на воде или воздухе, и класса точности 0,4, градуируемые на реальной измеряемой среде. Абсолютная погрешность ротаметра Δ рассчитывается по формуле

$$\Delta = (0,25Q_{\max} + 0,75Q) \frac{K}{100},$$

где $Q_{\max}$ — верхний предел измерения;

Q — измеряемый расход;

K — класс точности ротаметра.

Наибольший расход таких поплавковых расходомеров по воде 150 м³/ч, по воздуху 3000 м³/ч. Относительный диапазон измерения $Q_{\max} : Q_{\min} = 10 : 1$.

2.7. Электромагнитные расходомеры

Принцип действия электромагнитных расходомеров основан на законе электромагнитной индукции. В проводнике, перемещающемся в магнитном поле, возникает электрический ток. Жидкость, обладающая даже незначительной электропроводностью, является проводником электрического тока. Поэтому при движении электропроводной жидкости в магнитном поле возникает электродвижущая сила ЭДС. Значение ЭДС зависит от скорости движения жидкости.

Схематично электромагнитный преобразователь расхода изображен на рисунке 13. Участок трубопровода 1 из немагнитного материала с нанесенным внутри электроизоляционным покрытием 2 размещается между полюсами магнита (индуктора возбуждения магнитного поля) 3. В направлении, перпендикулярном к направлению магнитных силовых линий, располагаются электроды 4.

При движении электропроводной жидкости возникает разность потенциалов E , которая воспринимается электродами. Значение разности потенциалов определяется выражением

$$E = BD_y v = \frac{4D_3}{\pi D^2_{\text{тр}}} BQ_0,$$

где B — индукция магнитного поля;
 D_3 — расстояние между электродами;
 $D_{тр}$ — внутренний диаметр трубопровода;
 v — средняя скорость жидкости;
 Q_0 — объемный расход.

При $D_3 = D_{тр} = D$

$$E = \frac{4\pi}{D} B Q_0.$$

Разность потенциалов воспринимается и усиливается нормирующим измерительным преобразователем и далее усиленный сигнал поступает на показывающий прибор.

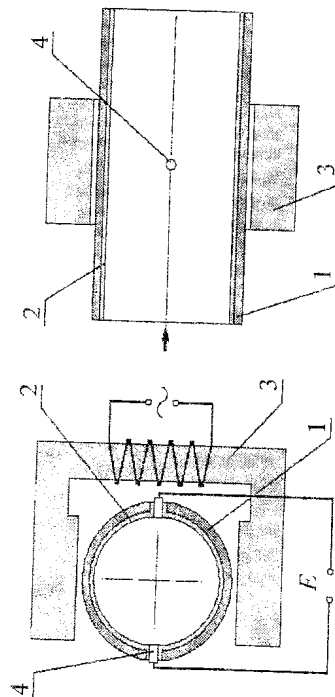


Рис. 13. Принципиальная схема электромагнитного преобразователя расхода:

1 — трубопровод; 2 — электроизоляционное покрытие;
 3 — магнит; 4 — электроды

При измерении расхода жидкости с электронной проводимостью (жидкие металлы) может использоваться постоянное магнитное поле. При измерении расхода жидкостей с ионной проводимостью при постоянном магнитном поле происходит поляризация электродов, что ослабляет и искажает выходной сигнал. Поэтому для таких жидкостей, т.е. для большинства жидкостей, встречающихся на практике, применяется переменное магнитное поле либо переключаемое постоянное магнитное поле.

Применение переменного магнитного поля промышленной или более высокой частоты приводит к появлению многочисленных помех. Поэтому в большинстве электромагнитных расходомеров часто-

используют переменного магнитного поля ниже 50 Гц. При этом применяются различные законы изменения магнитного поля. Некоторые из этих законов иллюстрируются на рисунке 14.

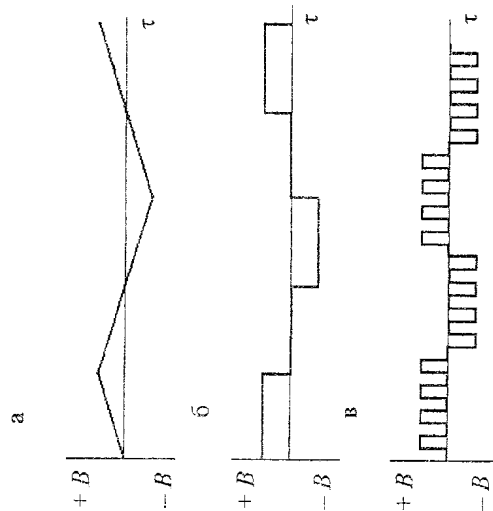


Рис. 14. Изменение магнитного поля:
 а, б — одночастотное, в — двухчастотное

На рисунке 14а приведен треугольный закон изменения магнитного поля с монотонным повышением и снижением магнитной индукции B , на рисунке 14б — ступенчатый закон, который достигается путем импульсного питания электромагнита от источника постоянного тока с изменением полярности. Двухчастотный закон изменения магнитной индукции приведен на рисунке 14в. Питание электромагнита осуществляется последовательными импульсами низкой частоты, на которые наложены импульсы, имеющие частоту выше промышленной. При этом низкочастотное питание электромагнита способствует стабилизации нуля, а высокочастотное защищает от гидродинамических шумов, вызванных турбулентными пульсациями расхода и наличием включений в потоке измеряемой жидкости.

Электромагнитные преобразователи пригодны для жидкостей, обладающих хотя бы минимальной электропроводностью — порядка 10^{-5} См/м. Они непригодны для измерения расхода газа и пара, а также жидкостей-диэлектриков, таких, как спирты и нефтепродукты. Электромагнитные расходомеры имеют ряд достоинств.

Они имеют линейную зависимость выходного сигнала от средней скорости потока. Они имеют также малую зависимость выходного сигнала от распределения скорости в сечении трубопровода. Поэтому длина прямых участков труб, требуемая при монтаже преобразователя расхода, меньше, чем у других типов расходомеров.

Электромагнитные расходомеры применимы для измерения как турбулентных, так и ламинарных потоков. Результат измерения мало зависит от загрязнения внутренней поверхности преобразователя расхода.

Выходной сигнал преобразователя расхода выдается в виде электрического напряжения, что позволяет после соответствующей обработки его непосредственно использовать.

Результаты измерения в нормальных условиях эксплуатации не зависят от температуры, вязкости, концентрации и давления контролируемой среды.

Результаты измерения не зависят от направления потока, можно контролировать расход пульсирующего потока.

Расположение первичного преобразователя в пространстве не оказывает влияния на результат измерения.

Отсутствие установленных в трубопроводе механических элементов, воздействующих на поток, обеспечивает малые потери давления. Установка преобразователя не изменяет профиль трубопровода и характер потока.

При соответствующем покрытии внутренних поверхностей расходомера и применении электродов, изготовленных из соответствующих материалов, можно измерять расход химически агрессивных и коррозионно-активных жидкостей. Разработаны электромагнитные расходомеры без специального внутреннего покрытия.

Наличие в потоке инородных частиц не оказывает существенного влияния на результат измерения, поэтому электромагнитные расходомеры применяются для контроля вязких и насыщенных твердыми токонепроводящими частицами сред. Дополнительное измерение электрического сопротивления потока позволяет одновременно контролировать содержание таких частиц в жидкости.

Электромагнитные расходомеры используются и для измерения расхода агрессивных, абразивных, вязких жидкостей и пульп, расплавленных металлов, т.е. сред, измерение расхода которых представляет существенные трудности.

Существенным достоинством электромагнитных расходомеров является возможность достаточно простой беспробивной (имитационной) поверки и наличие специальных установок для такой поверки.

Применяются электромагнитные преобразователи расхода с $D_y = 10 \dots 3000$ мм, расход жидкости до $3 \cdot 10^5 \text{ м}^3/\text{ч}$. Погрешность электромагнитных преобразователей 0,5...1,0 % (0,2...0,3 % у наиболее точных). Для получения такой точности требуется предусматривать прямые участки трубопроводов, равные 5 диаметрам до преобразователя и 3 диаметрам после.

Наряду с рассмотренными полнопроходными электромагнитными расходомерами для измерения расхода жидкости в каналах большого диаметра от 300 до 4000 мм применяются погружные расходомеры с электромагнитными преобразователями скорости. Измерение осуществляется методом «площадь — скорость» в соответствии с ГОСТ 8.361—76. Скорость измеряется одним или тремя преобразователями, расположенными под углом 120° (см. рис. 15). Электромагнитный преобразователь скорости представляет собой пустотелый обтекатель, в котором размещены обмотки возбуждения магнитного поля и электроды.

При необходимости измерения расхода в трубе большого диаметра в стенке трубы вырезается отверстие. К краям отверстия приваривается фланец, на котором крепится преобразователь скорости. Измерение производится на радиусе трубы, для которого известно соотношение местной и средней по сечению скорости жидкости.

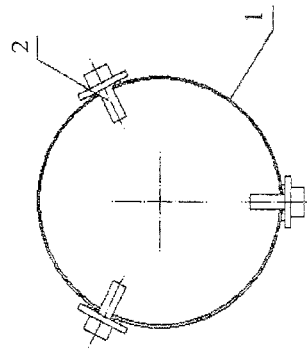


Рис. 15. Размещение электромагнитных преобразователей скорости:

1 — трубопровод;

2 — преобразователь скорости

Погрешность измерения скорости потока 1,5 %, объемного расхода и объема жидкости 2,5 %. Для обеспечения такой точности измерения расхода

да при использовании одного преобразователя скорости необходимо предусматривать достаточно длинные прямые участки. Согласно ГОСТ 8.361—76 они должны быть не менее $30 \dots 80$ диаметров до измерительного сечения в зависимости от типа местных сопротивлений и не менее 5 диаметров после. Установка трех преобразователей скорости позволяет проводить измерения при длинах прямых участков, в несколько раз меньших.

2.8. Ультразвуковые расходомеры

Принцип действия ультразвуковых расходомеров основан на измерении того или иного эффекта, возникающего при прохождении акустических колебаний через поток измеряемой среды. Ультразвуковые расходомеры включают в себя расходомеры, основанные на перемещении акустических колебаний движущейся средой, и преобразователи, основанные на эффекте Доплера.

Наибольшее распространение нашли расходомеры, основанные на измерении разницы времени или скорости прохождения акустических колебаний, направленных по потоку и против потока. Такие расходомеры применяются при измерении расхода жидкостей и газов. Основным требованием к измеряемой среде является ее акустическая проницаемость.

В качестве излучателей и приемников акустических колебаний используются пьезоэлементы. Под воздействием акустических колебаний происходит сжатие — расширение кристалла, на его поверхностях образуются электрические заряды. Работа приемника акустических колебаний основана на прямом пьезоэффекте, работа излучателя — на обратном пьезоэффекте: при приложении к поверхностям кристалла переменного напряжения пьезоэлемент будет растягиваться и сжиматься, возбуждая в измеряемой среде акустические колебания.

Излучатели и приемники акустических колебаний располагаются под некоторым углом к оси трубы. Первые ультразвуковые преобразователи расхода выполнялись с двумя акустическими каналами (рис. 16а). Большинство современных ультразвуковых преобразователей выполняются одноканальными (рис. 16б). Пьезоэлементы попеременно выполняют функции излучателя и приемника. Сначала акустические колебания от излучателя направляются по потоку и воспринимаются приемником. Затем приемник становится излучателем, акустические колебания направляются против потока и воспринимаются приемником.

По принципу действия измерительной схемы ультразвуковые преобразователи подразделяются на:

- времяимпульсные;
- частотно-импульсные;
- дифференциально-фазовые.

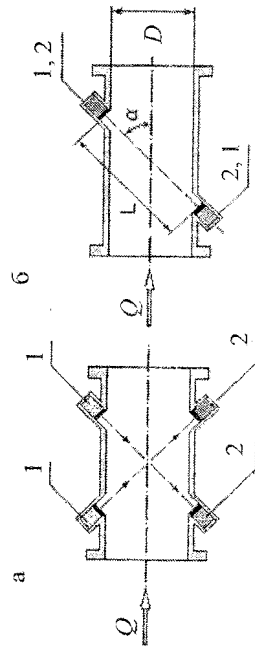


Рис. 16. Ультразвуковые преобразователи расхода: а — двухканальный; б — одноканальный; 1, 2 — пьезоэлементы: излучатель и приемник акустических колебаний

Во времяимпульсных преобразователях происходит непосредственное измерение времени прохождения коротких импульсов от излучателя до приемника, направленных по потоку и против потока.

Время прохождения импульса от излучателя до приемника при направлении по потоку

$$T_1 = \frac{L}{c + v_L \cos \alpha},$$

против потока

$$T_2 = \frac{L}{c - v_L \cos \alpha},$$

где T_1 и T_2 — время прохождения акустических колебаний, направленных по и против потока;

L — длина акустического канала;

c — скорость звука в измеряемой среде;

v_L — средняя скорость среды по длине акустического канала;

α — угол наклона акустического канала.

$$v_L = \frac{L}{2 \cos \alpha} \cdot \frac{T_2 - T_1}{T_1 T_2}.$$

В частотно-импульсных преобразователях попеременно подаются серии коротких импульсов, направленных по и против потока. При поступлении акустического сигнала на приемник посылаются следующий импульс и т.д. Возникает последовательность импульсов, частота которых обратно пропорциональна времени прохождения импульса от излучателя до приемника.

Разница частот импульсов, направленных по потоку и против потока, определяется скоростью измеряемой среды.

Скорость акустических колебаний, направленных по потоку,

$$c + v_L \cos \alpha = \frac{L}{T_1},$$

частота импульсов

$$f_1 = \frac{1}{T_1} = \frac{c + v_L \cos \alpha}{L}.$$

Скорость акустических колебаний, направленных против потока,

$$c - v_L \cos \alpha = \frac{L}{T_2},$$

частота импульсов

$$f_2 = \frac{1}{T_2} = \frac{c - v_L \cos \alpha}{L}.$$

Разница частот

$$\Delta f = f_1 - f_2 = \frac{2 \cos \alpha}{L} v_L.$$

Скорость потока

$$v_L = \frac{L}{2 \cos \alpha} \Delta f.$$

В дифференциально-фазовых преобразователях измеряется разность фазовых сдвигов ультразвуковых колебаний, возникающих на приемниках при прохождении колебаний по потоку и против потока,

$$\Delta \phi = 2\pi f \Delta T = \frac{2L \omega \cos \alpha}{c^2} v_L,$$

где $\Delta \phi$ — разность фазовых сдвигов;

ΔT — разность времени прохождения акустических колебаний, направленных против и по потоку;

f и ω — частота и круговая частота акустических колебаний.

В дифференциально-фазовых преобразователях выходной сигнал зависит от скорости звука в среде. Для устранения погрешности, вызванной изменением скорости звука, необходимо вводить специальные схемы коррекции. Во время импульсных и частотно-импульсных

преобразователях выходной сигнал практически не зависит от скорости звука. Наличие этой зависимости определяется только временем задержки сигнала в электронно-акустическом тракте, не связанной с прохождением сигнала в измеряемой жидкости.

Основные схемы расположения пьезоэлементов и распространения акустических колебаний в ультразвуковых преобразователях расхода приведены на рисунке 17.

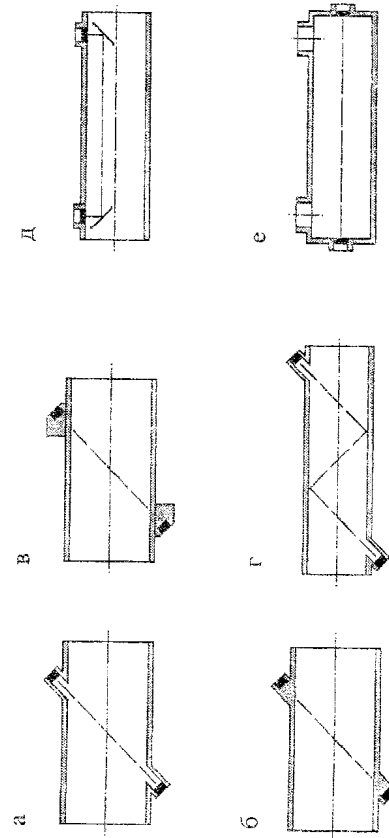


Рис. 17. Схемы ультразвуковых преобразователей расхода:

а — схема со свободными карманами для размещения пьезоэлементов;

б — схема с заполнением карманов;

в — схема с наружным расположением пьезоэлементов;

г — схема с многократным отражением акустических колебаний

от стенки трубы; д — схема с отражателями акустических колебаний;

е — схема с излучением, направленным вдоль оси трубы, и боковым подводом жидкости

Преобразователи со свободными карманами (рис. 17а) во избежание их засорения применяют для чистых и неагрессивных сред. Другой их недостаток — возможность появления вихреобразования и влияние на профиль скоростей. Для исключения этого применяют преобразователи с карманами, заполненными звукопроводом из металла или органического стекла (рис. 17б), и преобразователи с наружным расположением пьезоэлементов (рис. 17в). Важное преимущество наружного расположения пьезоэлементов — это отсутствие контакта с измеряемым веществом и ненарушение целостности трубопровода при монтаже. Однако при этом возрастает уровень помех, вызванных прохождением акустических колебаний по стенке трубы, и снижается точность измерения.

В трубах малого диаметра при направлении акустических колебаний под углом к оси трубы трудно получить большую длину акустического канала. Для этого используются многократное отражение акустических колебаний от стенки трубы (рис. 17г), специальные устройства — внутренние внутри трубы отражатели (рис. 17д) и боковой подвод жидкости в трубу (рис. 17е).

В ультразвуковых преобразователях расхода выходной сигнал пропорционален средней скорости потока по длине акустического канала U_L . Таким образом, происходит осреднение скорости не по всему сечению трубопровода с внутренним диаметром D , а только по линии акустического канала. Отличие средних скоростей по сечению и по линии учитывается гидродинамическим коэффициентом k . Объемный расход

$$Q_0 = kv_L \frac{\pi D^2}{4}.$$

Значение этого гидродинамического коэффициента зависит от распределения скорости по сечению преобразователя расхода.

Для сформировавшегося течения распределение скорости определяется числом Рейнольдса и шероховатостью трубопровода. При изменении расхода в пределах диапазона измерения изменяются число Рейнольдса и значение гидродинамического коэффициента, что приводит к увеличению погрешности. Кроме того, для формирования распределения скорости в сечении, соответствующего режиму течения, необходимо предусматривать длинные прямые участки трубопроводов до и после преобразователя. В зависимости от типа местных сопротивлений в трубопроводе эти длины составляют 20...50 диаметров трубопровода до преобразователя расхода и 5...10 диаметров после.

Для снижения влияния распределения скорости на результаты измерения используются следующие способы:

- излучатель и приемник располагают не по диаметру трубопровода, а по хорде. Расположение выбирается таким образом, чтобы гидродинамический коэффициент, т.е. отношение средних скоростей по сечению и по хорде, было равно единице (расстояние от хорды до диаметра составляет $0,5...0,54$ радиуса трубы);

- организуется несколько акустических каналов (многолучевые преобразователи). В этом случае происходит осреднение скорости по нескольким линиям.

Расположение акустических каналов в ультразвуковых преобразователях схематично показано на рисунке 18. Применение многолучевых преобразователей позволяет не только снизить влияние многолучевости скорости в сечении, но и в целом повысить точность измерения.

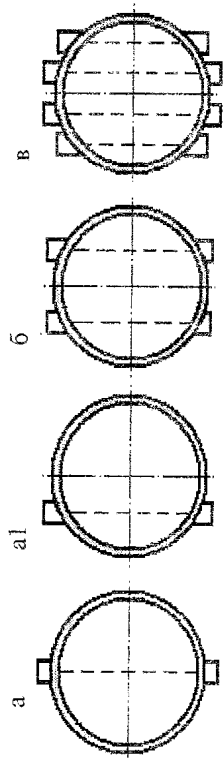


Рис. 18. Расположение акустических каналов в ультразвуковых преобразователях расхода:

а — однолучевой с акустическим каналом по диаметру;
а1 — однолучевой с акустическим каналом по хорде;
б — двухлучевой; в — четырехлучевой

С использованием ультразвуковых преобразователей производится измерение в трубопроводах диаметром 25...4000 мм. Наибольший расход в пределах $Q_{\max} = 1...105 \text{ м}^3/\text{с}$.

Погрешность измерения расхода и количества жидкости с использованием ультразвуковых преобразователей с колебаниями, направленными по и против потока, составляет 0,5...1,0 %, расхода и количества газа 1...2 %. Применение многолучевых преобразователей расхода позволяет значительно повысить точность измерения. При измерении расхода и объема жидкости пятилучевые преобразователи позволяют вести измерения с погрешностью 0,15 %, трехлучевые 0,3 %.

Ультразвуковые расходомеры и счетчики для учета природного газа за рубежом выпускаются с $D_y = 150...1050 \text{ мм}$, максимальная скорость газа 35...21 м/с. Погрешность у лучших образцов (с четырехлучевыми и пятилучевыми преобразователями расхода): при беспробной калибровке 1,0 % относительный диапазон измерения $Q_{\max} : Q_{\min} = 100 : 1$, при калибровке на эталонной установке 0,3...0,4 % относительный диапазон измерения 50 : 1.

Принцип действия **доплеровского ультразвукового преобразователя расхода** основан на изменении частоты акустических колебаний, отраженных от неоднородностей, присутствующих в потоке. Схема преобразователя приведена на рисунке 19.

Разница частот акустических колебаний Δf , посылаемых излучателем 1 и воспринимаемых приемником 2, пропорциональна скорости потока:

$$\Delta f = f_1 - f_2 = \frac{2f_1 \cos \alpha}{c} v,$$

где f_1 — частота акустических колебаний, посылаемых излучателем; f_2 — частота акустических колебаний, воспринимаемых приемником; c — скорость звука; v — скорость потока.

В последнее время доплеровские ультразвуковые преобразователи все более широко применяются для измерения расхода загрязненных сред. Относительная погрешность 2...3 %. Излучатель и приемник часто располагаются снаружи трубы.

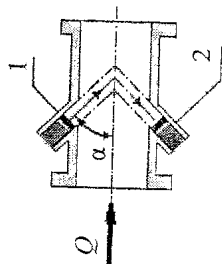


Рис. 19. Доплеровский преобразователь расхода:
1 — излучатель;
2 — приемник

2.9. Корреляционные расходомеры

Принцип действия корреляционного расходомера основан на измерении времени прохождения неоднородностей в потоке между двумя сечениями трубопровода. Такими неоднородностями могут быть пузырьки газа, твердые частицы, а также турбулентные возмущения, которые всегда присутствуют в турбулентном потоке. Схематично корреляционный расходомер изображен на рисунке 20.

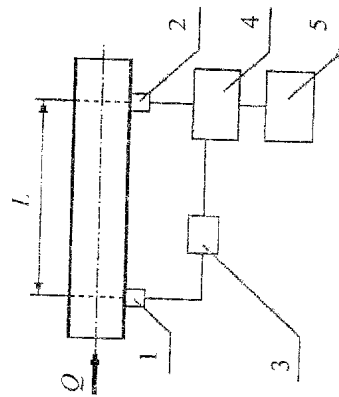


Рис. 20. Схема корреляционного расходомера:
1, 2 — датчики неоднородностей; 3 — блок задержки;
4 — вычислительное устройство (коррелятор); 5 — устройство индикации

Корреляционные расходомеры по принципу действия близки к меточным. В меточных расходомерах в поток вводится метка (оптическая, тепловая, ионизационная и т.д.) и фиксируется время прохождения метки между двумя контрольными сечениями. В корреляционном преобразователе фиксируется время прохождения естественных неоднородностей, имеющихся в потоке.

Датчики неоднородностей вырабатывают непрерывные сигналы, соответствующие характеру изменения случайных процессов в контрольных сечениях: датчик 1 — сигнал $x(t)$; датчик 2 — сигнал $y(t)$.

Сигналы датчиков 1 и 2 (рис. 21а) имеют случайный характер, но за счет небольшого расстояния между сечениями они имеют тесную корреляционную связь. Коррелятор вычисляет взаимную корреляционную функцию

$$R(\tau) = \frac{1}{T} \int x(t - \tau) y(t) dt,$$

где T — период интегрирования;

t — текущее время;

τ — время задержки сигнала датчика 1.

Эта функция имеет резко выраженный максимум при значении τ_n , равном времени перемещения неоднородностей потока между сечениями (рис. 21б).

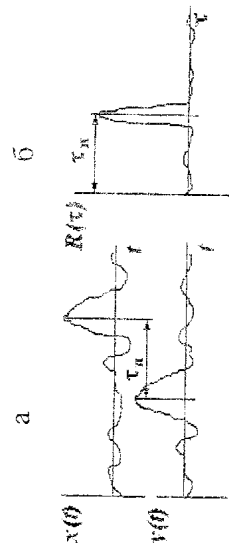


Рис. 21. Принцип действия корреляционного расходомера:
а — сигналы датчиков 1 и 2; б — вид корреляционной функции

Скорость потока

$$v = \frac{L}{\tau_n}.$$

Объемный расход

$$Q_0 = kF \frac{L}{\tau_n},$$

где L — расстояние между сечениями;

$\tau_{\text{п}}$ — время прохождения неоднородностей между сечениями;

F — площадь поперечного сечения трубопровода;

k — коэффициент пропорциональности, учитывающий свойства вещества и влияние профиля скорости в сечении.

В зависимости от вида и способа контроля параметров потока существуют различные корреляционные преобразователи расхода: ультразвуковые, оптические, емкостные и т.д. Наибольшее применение нашли ультразвуковые корреляционные преобразователи. В их контрольных сечениях располагаются излучатели акустических колебаний. Колебания направлены перпендикулярно потоку и воспринимаются приемниками, находящимися на противоположной стороне трубы. Присутствие в потоке неоднородностей вызывает ослабление акустических колебаний, поступающих на приемники.

Корреляционные расходомеры используются для измерения маловязких жидкостей в трубопроводах диаметром 50...3600 мм. Наибольший расход в пределах $35...5,4 \cdot 10^5 \text{ м}^3/\text{ч}$. Погрешность измерения расхода и количества 1,5...2,5 %. При монтаже корреляционного преобразователя расхода необходимо предусматривать прямые участки трубопровода: не менее 5 диаметров до места расположения датчиков и не менее 1 диаметра после.

2.10. Вихревые расходомеры

Принцип действия вихревых расходомерительных устройств основан на зависимости частоты возникающих в потоке измеряемой среды вихрей от расхода. Известно несколько типов вихревых преобразователей расхода, но применяются в основном преобразователи с размещенным в трубопроводе плохобтекаемым телом и образованием вихревой дорожки Кармана. Принцип действия такого расходомера основан на широко известном явлении, заключающемся в том, что движущегося потока образуются завихрения.

Схематично вихревой преобразователь расхода представлен на рисунке 22.

В корпусе преобразователя 1 размещается плохобтекаемое тело 2. При течении измеряемой среды на боковых поверхностях тела возникает положительный градиент давления. За счет этого при определенных режимах течения (числа Рейнольдса Re выше 100) происходит образование вихрей. Вихри возникают попеременно с каждой стороны тела, отрываются от его поверхности и распространяются

вместе с потоком, образуя вихревую дорожку Кармана 3. Вихревая дорожка Кармана — это цепочка чередующихся вихрей, закрученных по и против часовой стрелки.

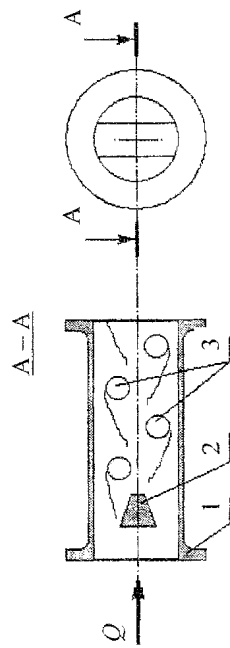


Рис. 22. Вихревой преобразователь расхода:

1 — корпус; 2 — плохобтекаемое тело; 3 — вихревая дорожка Кармана

Частота образования вихрей f определяется по формуле

$$f = \text{Sr} \frac{v}{d},$$

где Sr — число Струхала;

v — скорость потока;

d — характерный размер обтекаемого тела.

Критерий (число) Струхала характеризует периодические процессы, связанные с движением жидкости или газа.

В общем случае число Струхала зависит от числа Рейнольдса. Минимальный расход, при котором формируются устойчивая дорожка Кармана и выходной сигнал преобразователя расхода, соответствует числу Рейнольдса $Re = 5000$. Оптимальные для измерения условия начинаются при $Re > 20000$. В этом диапазоне число Струхала остается практически постоянным (см. рис. 23).

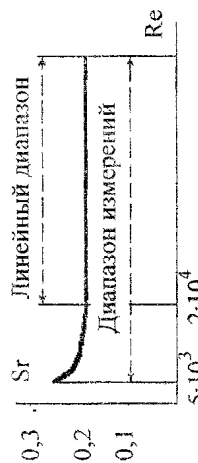


Рис. 23. Зависимость числа Струхала от числа Рейнольдса

Зависимость между объемным расходом и частотой образования вихрей

$$Q_0 = \frac{Fd}{Sr} f,$$

где F — площадь наименьшего поперечного сечения вихря вокруг обтекаемого тела.

При постоянном значении числа Струхала зависимость между расходом и частотой образования вихрей линейная. При меньших расходах зависимость коэффициента преобразования вносится в числительное устройство расходомера. Относительный диапазон измерения зависит от вязкости измеряемой среды (для газа) и от давления и составляет 20:1 при низких давлениях и 100:1 при высоких (более 20 бар).

Имеется несколько способов преобразования вихревого движения в выходной частотный сигнал. Они основаны на использовании периодических колебаний давления с обеих сторон обтекаемого тела или колебаний скорости потока. Регистрируются прохождение вихрей дорожки Кармана ультразвуковыми, электромагнитными или емкостными датчиками, колебания скорости термоанемометрами, колебания давления на поверхности обтекаемого тела или деформация тела тензорезистивными или пьезодатчиками.

Вихревые расходомеры применяются для измерения расхода газа, пара, чистых жидкостей с низкой вязкостью и умеренно вязких (до 7 мПа·с). Скорость жидкости до 10 м/с, газа до 80 м/с.

Выпускаются вихревые расходомеры и счетчики диаметром 15...300 мм, наибольший расход жидкости 8...1800 м³/ч, газа 5000 м³/ч. Погрешность измерения расхода жидкости 0,5...1,5 %, объема жидкости 0,5...1,0 %, расхода и объема газа и пара 1,0...2,0 %. Для обеспечения такой точности необходимо предусматривать прямые участки трубопровода до и после преобразователя. Требуемая длина зависит от типа местных сопротивлений в трубопроводе и точности измерения. В среднем она составляет 10 диаметров до преобразователя и 5 диаметров после.

2.11. Струйные расходомеры

Струйные расходомеры (расходомеры с осциллирующей струей) можно считать разновидностью вихревых расходомеров. Они применяются для измерения небольших расходов жидкости и газа.

Принцип действия струйного расходомера иллюстрируется схемой на рисунке 24. Поток газа проходит через сопло и попадает в диффузор прямоугольного сечения. Под влиянием случайных причин поток прижимается к той или иной стенке диффузора (например, как показано на рисунке, к нижней стенке). На выходе из диффузора отбрасывается часть струи, которая проходит по нижнему обводному каналу и перекрывает струю, выходящую из сопла, в верхнее положение. Затем процесс повторяется, но уже в обратном направлении. Таким образом, происходит процесс колебаний струи, который сопровождается колебаниями давления с обеих сторон струи. Колебания давления преобразуются в электрические импульсы. Частота импульсов пропорциональна расходу.

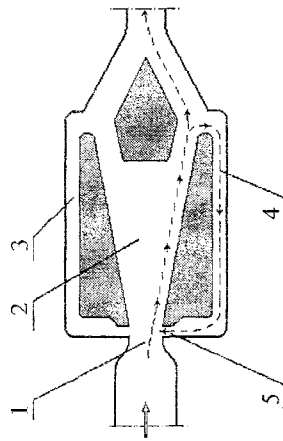


Рис. 24. Струйный преобразователь расхода:

1 — входное сопло; 2 — диффузор;
3, 4 — верхний и нижний обводные каналы; 5 — управляющее сопло

Частота колебаний f пропорциональна объемному расходу и определяется по выражению

$$f = k \frac{Q_0}{lF},$$

где k — коэффициент, отражающий конструктивные особенности преобразователя расхода;
 l — длина диффузора;
 F — площадь сечения сопла.

Струйные расходомеры применяются для измерения расхода жидкостей до нескольких м³/ч с погрешностью 1,0 %, газов — до 100 м³/ч с погрешностью 1,5 %.

2.12. Кориолисовы расходомеры

Кориолисовы расходомеры являются новыми средствами измерений. Серийный выпуск расходомеров с колебательным движением измерительной трубки (вибрационных) начался только в конце 70-х годов XX века. Предлагающиеся ранее конструкции с вращающимися измерительными трубками применения не нашли.

Принцип действия кориолисовых расходомеров основан на возникновении кориолисового ускорения и кориолисовой силы при сложном движении тела. Появление кориолисового ускорения объясняется взаимным влиянием относительного и переносного движения, когда переносное движение является непоступательным.

В кориолисовом расходомере измеряемая среда течет по измерительной трубке (относительное движение). Измерительная трубка приводится в вынужденное колебательное движение (переносное движение). Характер деформации трубки при колебательном движении зависит от массового расхода. Применяются расходомеры с изогнутыми (U-образной, S-образной и др.) и прямолинейными измерительными трубками.

На рисунке 25 иллюстрируется принцип действия кориолисового расходомера с U-образной трубкой.

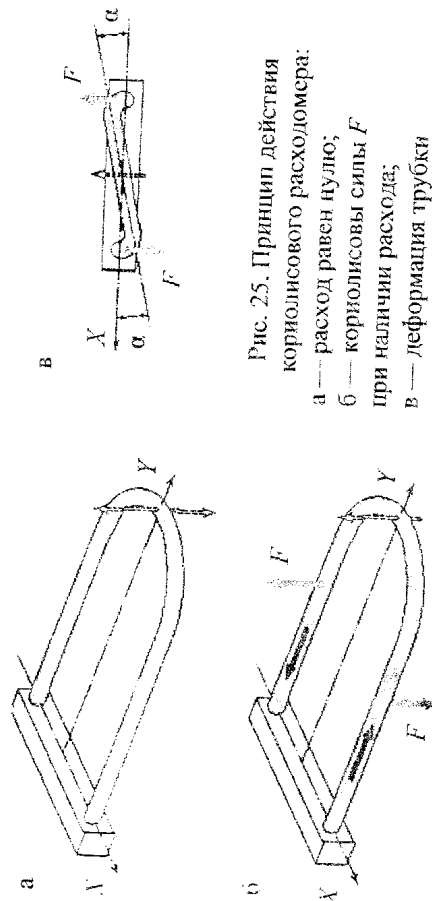


Рис. 25. Принцип действия кориолисового расходомера:
а — расход равен нулю;
б — кориолисовы силы F при наличии расхода;
в — деформация трубки

Измерительная трубка с помощью электромагнитной катушки приводится в вынужденное колебательное движение относительно оси X с частотой собственных колебаний (амплитуда менее 1 мм, частота — десятки герц). При отсутствии расхода на трубку воздействует только привод. Деформация обоих колен трубки при колебаниях

одинакова. При наличии расхода измеряемая среда сопротивляется движению трубки. При движении трубки вверх (рис. 25б) измеряемая среда, втекающая в трубку, давит на трубку вниз. На выходе из трубки измеряемая среда дополнительно способствует движению вверх. Возникают кориолисовы силы F , которые создают момент относительно оси Y . Это приводит к закручиванию трубки относительно оси Y (рис. 25в). Во время второго периода колебаний (при движении трубки вниз) трубка закручивается в обратную сторону. Угол закручивания α пропорционален действующему моменту и массовому расходу.

Принцип действия расходомера с прямой трубкой показан на рисунке 26. Измерительная трубка приводится в установившийся режим колебаний. При отсутствии потока кориолисова сила равна нулю. Деформация трубки при отсутствии расхода вызывается только давлением (рис. 26а). При наличии расхода частицы жидкости между точками A и C ускоряются, а между точками C и B замедляются. Кориолисова сила, возникающая за счет инерции частиц жидкости, вызывает деформацию измерительной трубки, которая накладывается на основную деформацию (рис. 26б). Разница фаз колебаний, воспринимаемых датчиками 2, пропорциональна массовому расходу.

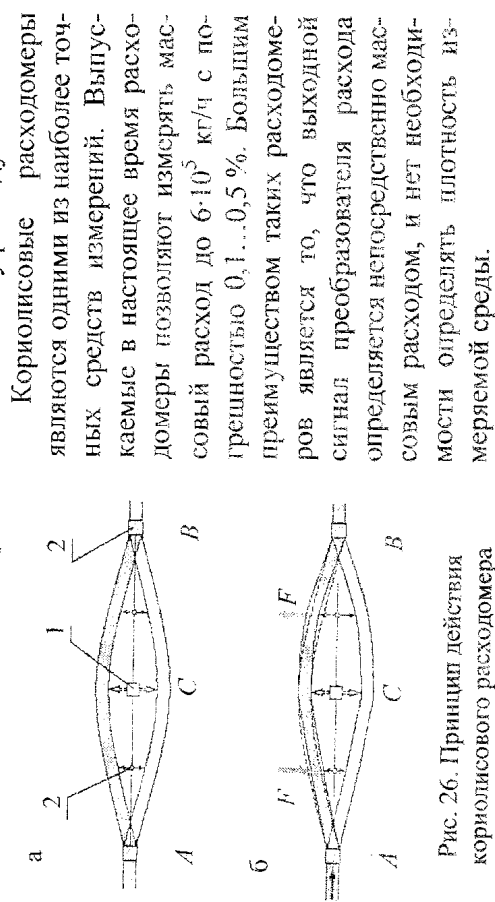


Рис. 26. Принцип действия кориолисового расходомера с прямой трубкой:
а — деформация трубки при отсутствии расхода;
б — деформация трубки при наличии расхода;
1 — привод; 2 — датчики

Кориолисовы расходомеры являются одними из наиболее точных средств измерений. Выпускаемые в настоящее время расходомеры позволяют измерять массовый расход до $6 \cdot 10^5$ кг/ч с погрешностью 0,1...0,5%. Большим преимуществом таких расходомеров является то, что выходной сигнал преобразователя расхода определяется непосредственно массовым расходом, и нет необходимости определять плотность измеряемой среды.

Возможно измерение расхода жидкости с незначительным (до 10...20% по объему) содержанием газа. Некоторые модификации кориолисовых расходомеров дополнительно обеспечивают изме-

рение плотности жидкости с погрешностью 0,5...2,0 кг/м³. Кориольные расходомеры могут использоваться также и для измерения расхода газа преимущественно высокого давления (более 60 бар). Погрешность измерения 0,5...1,0 %.

2.13. Тепловые расходомеры

Принцип действия тепловых расходомеров основан на зависимости от расхода теплового воздействия на поток или на тело, контактирующее с потоком. По характеру теплового воздействия с потоком тепловые расходомеры подразделяются на калориметрические и термоанемометрические.

Принцип действия **калориметрического** расходомера иллюстрируется на рисунке 27.

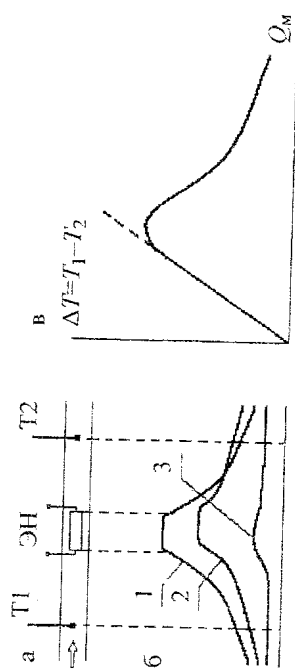


Рис. 27. Принцип действия калориметрического расходомера: а — схема расходомера, ЭН — электронагреватель, Т1 и Т2 — термопреобразователи температуры; б — распределение температуры; 1 — расход равен нулю, 2 — малый расход, 3 — большой расход; в — зависимость разницы температур от массового расхода

Калориметрический расходомер состоит из нагревателя и двух термопреобразователей, расположенных до и после нагревателя по ходу потока. Распределение температур по обе стороны от нагревателя зависит от массового расхода Q_m . При отсутствии расхода температураное поле вокруг нагревателя симметрично. Разница температур, воспринимаемых термопреобразователями,

$$\Delta T = T_2 - T_1 = 0.$$

При наличии расхода симметрия нарушается (см. рис 27б, кривая 2).

При малых расходах температура T_1 снижается вследствие притока холодного вещества, а температура T_2 возрастает. За счет этого разницы температур ΔT возрастает. При дальнейшем увеличении расхода температура T_1 становится постоянной и равной температуре притекающего вещества, а температура T_2 снижается.

При больших расходах разница температур ΔT определяется из теплового баланса:

$$\Delta T = \frac{W}{c_p Q_m},$$

где W — мощность нагревателя;

c_p — теплоемкость измеряемой среды.

Таким образом, зависимость ΔT от расхода различна для малых и больших расходов. При малых значениях расхода ΔT увеличивается с ростом расхода, и эта зависимость близка к линейной. При больших расходах значение ΔT обратно пропорционально массовому расходу.

Для измерения используется диапазон малых расходов, в котором значение ΔT практически пропорционально массовому расходу. При этом непосредственно можно измерить лишь очень маленькие расходы. Применение принципа **парциального расходомера** позволяет значительно расширить диапазон измерения. В парциальном расходе измеряется доля основного потока, протекающего в обводной трубке, подключенной параллельно к основному трубопроводу. Расход через обводную трубку должен быть пропорционален расходу через основной трубопровод.

Тепловой расходомер с парциальным калориметрическим преобразователем расхода приведен на рисунке 28.

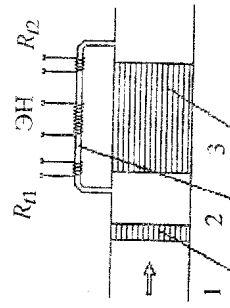


Рис. 28. Парциальный тепловой расходомер: 1 — ламинизатор потока; 2 — пропорциональный делитель потока; 3 — капиллярная трубка; ЭН — электронагреватель; R_1, R_2 — термопреобразователи сопротивления

Парциальный калориметрический преобразователь расхода представляет собой капиллярную трубку, на поверхности которой размещены: электроннагреватель ЭН, термопреобразователи сопротивления R_1 и R_2 . Термопреобразователи включены в мостовую измерительную схему.

Жидкость в трубопроводе проходит через ламинизатор, который подает имеющиеся в потоке турбулентные возмущения. Часть потока жидкости, которая строго пропорциональна общему расходу, проходит через капиллярную трубку. Пропорциональность обеспечивается тем, что в делителе погока, так же как и в капиллярной трубке, обеспечивается ламинарный режим течения. Разница температур, воспринимаемых термопреобразователями, $\Delta T = T_2 - T_1$ и выходной сигнал преобразователя расхода пропорциональны массовому расходу и теплосмкости измеряемого газа:

$$\Delta T = k c_p Q_m,$$

где k — коэффициент пропорциональности.

Отсюда

$$Q_m = \frac{\Delta T}{k c_p} = k_{гр} \Delta T.$$

Значение $k_{гр}$ определяется при градуировке расходомера на эталонной расходомерной установке. При измерении расхода среды, теплосмкость которой отличается от теплосмкости газа, использованного при градуировке, необходимо учитывать поправочный коэффициент.

Принцип действия **термоанемометра** основан на зависимости между потерей тепла непрерывно нагреваемого тела и скоростью среды, в которой это тело расположено.

Основное назначение термоанемометров — измерение местной скорости. Они могут служить для измерения расхода, когда известно соотношение между местной и средней скоростью, или тогда, когда непосредственно измеряется средняя скорость (например, в соответствии с ГОСТ 8.361-79).

Мощность, передаваемая нагреваемым телом газу,

$$W = \alpha F (T_c - T),$$

где F — площадь теплообмена;

α — коэффициент теплоотдачи;

T — температура газа;

T_c — температура стенки тела.

Теплоотдача при обтекании тела в общем случае описывается уравнением

$$Nu = A Re^n Pr^m \left(\frac{Pr}{Pr_c} \right)^l,$$

где Nu — критерий Нуссельта;

A — коэффициент пропорциональности;

Re — критерий Рейнольдса;

Pr — критерий Прандтля при температуре газа T ;

Pr_c — критерий Прандтля при температуре стенки тела T_c ;

n, m, l — показатели степени, зависящие от режима течения.

$$Nu = \frac{\alpha d}{\lambda}; Re = \frac{(\rho v) d}{\mu}; Pr = \frac{\mu c}{\lambda},$$

где d — характерный размер обтекаемого тела;

λ — коэффициент теплопроводности газа;

(ρv) — массовая скорость газа;

μ — коэффициент кинематической вязкости;

c — теплоемкость газа.

Отсюда

$$W = A \left[\frac{1}{\mu^n} Pr^m \left(\frac{Pr}{Pr_c} \right)^l \right] \lambda \left[d^{(n-1)F} (T_c - T) \right] (\rho v)^n.$$

Таким образом, мощность, передаваемая нагреваемым телом газу, зависит от массовой скорости ρv , разности температур $T_c - T$, геометрических параметров F , d и свойств измеряемой среды μ , λ , Pr , Pr/Pr_c .

Скорость можно определять по зависимости $W = f(\rho v)$ при условии $T_c - T = \text{const}$ или по зависимости $(T_c - T) = f(\rho v)$ при условии $W = \text{const}$.

3. РАСХОДОМЕРНЫЕ УСТАНОВКИ ДЛЯ ПОВЕРКИ И КАЛИБРОВКИ РАСХОДОИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ

Поверка и калибровка расходомеров и счетчиков проводятся проливным методом с применением расходомерных установок и беспроточным методом. Беспроточный метод применим только для определенных типов расходоизмерительных устройств. Проточный метод принципиально применим для любого расходоизмерительного устройства. Ограничения применения этого метода определяются техническими и экономическими трудностями создания расходомерных установок для больших расходов и сред с особыми свойствами.

Установки для поверки проливным методом счетчиков и расходомеров по своей гидравлической схеме близки. Отличие заключается в том, что, как правило, при поверке расходомеров более жесткие требования предъявляются к стабильности поддержания расхода.

3.1. Состав расходомерных установок

Несмотря на достаточно большое число схемных решений состав всех расходомерных установок практически одинаков. Установки включают в себя:

- средства хранения и подготовки поверочной среды;
- устройства создания и стабилизации напора;
- испытательный участок для установки преобразователей расхода поверяемых приборов;
- эталонное средство для определения действительного значения измеряемой величины (количества вещества или расхода);
- устройства для заправки поверочной среды и опорожнения трубопроводов;
- систему управления и регистрации.

Средства хранения и подготовки поверочной среды должны обеспечивать требуемые параметры среды и их постоянство в процессе поверки. Поддержание требуемой температуры может происходить за счет естественного теплообмена с окружающей средой или специальными устройствами термостатирования. В жидкостных установках необходимо обеспечить дегазацию поверочной среды.

Устройства для создания и стабилизации напора в жидкостных установках включают в себя насос для создания напора, напорный бак или ресивер, заполненный сжатым газом, для демпфирования пульсаций, создаваемых насосом, и стабилизации расхода.

В тех случаях, когда допускаются определенные изменения расхода в процессе поверки и на показания поверяемого прибора не оказывают влияния пульсации давления жидкости, жидкость может подаваться в испытательный участок непосредственно от насоса.

Испытательный участок предназначен для установки одного или нескольких преобразователей расхода поверяемых или градуируемых приборов. На входе в преобразователи расхода должны быть обеспечены требуемые параметры потока по распределению скорости в сечении трубопровода и стабильность во времени. Для этого предусматриваются прямые участки трубопроводов до и после преобразователей поверяемых приборов. Кроме того, перед преобразователями расхода могут устанавливаться выпрямители потока.

Устройство для регулирования расхода монтируется на выходе из испытательного участка для уменьшения деформации потока перед поверяемыми приборами. В качестве таких устройств обычно используются один или несколько регулирующих вентилей. Значение расхода контролируется по эталонному или поверяемому приборам либо по специально предусмотренному указателю расхода.

В современных поверочных установках применяются насосы с регулированием производимости путем изменения частоты вращения. За счет этого обеспечивается плавный пуск и грубое регулирование расхода. Точное регулирование осуществляется регулирующими вентилями.

Эталонное средство для определения действительного значения измеряемой величины.

Действительное значение расхода при поверке расходомеров определяется:

- эталонным расходомером;
- косвенным методом на основе измерения количества вещества и промежутка времени.

Действительное значение количества при поверке счетчиков определяется:

- эталонным счетчиком;
- эталонным средством измерения объема или массы;
- косвенным методом на основе измерения расхода и промежутка времени.

Благодаря применению эталонных счетчиков и расходомеров в поверочных установках габаритные размеры, вес и стоимость поверочной установки относительно небольшие. В ряде случаев такие установки могут применяться для поверки расходоизмерительных

устройств непосредственно на месте эксплуатации (например, для поверки бытовых счетчиков воды и природного газа). В свою очередь эталонные счетчики и расходомеры должны поверяться на соответствующих эталонных расходомерных установках.

Установки с эталонными средствами измерения количества вещества и промежуток времени аттестуются и поверяются косвенным методом без использования эталонных расходомерных установок.

Объем жидкости в таких установках измеряется эталонными мерами вместимости (мерными баками или эталонными мерниками) — трубопоршневыми установками, объемом газа — грузоколицевыми и колокольными газовыми мерниками и газовыми трубопоршневыми установками. В массовых расходомерных установках для измерения количества мерные баки устанавливаются на эталонные циферблатные или грузопоршневые весы.

3.2. Жидкостные расходомерные установки

Схема статической расходомерной установки (классической расходомерной установки) приведена на рисунке 29.

Конструкция сливной емкости 1 должна обеспечивать дегазацию жидкости и исключать существенный нагрев в процессе работы. Поэтому объем сливной емкости выбирается в 2...3 раза больше, чем суммарный объем всех остальных частей установки. При необходимости в сливной емкости предусматривают устройство для стабилизации температуры жидкости.

Устройство для создания и стабилизации расхода включает в себя: насос 2, напорный бак 3 и байпасный трубопровод 4. Производительность насоса несколько (в 1,2...1,3 раза) больше, чем максимальный расход устройств, поверяемых на установке. Напорный бак имеет переливные лотки для стабилизации уровня, напора и расхода. Избыточное количество жидкости, поступающей в бак от насоса, переливается через лотки и возвращается в сливную емкость через байпасный трубопровод.

Для создания требуемого напора бак располагают на большой высоте или наддувают бак нейтральным газом. Нахождение бака на большой высоте позволяет стабилизировать расход, так как при этом снижаются относительные значения колебаний уровня в баке и напора. При наддуве бака газом на стабильность расхода помимо колебаний уровня в баке оказывает влияние и точность поддержания давления газа.

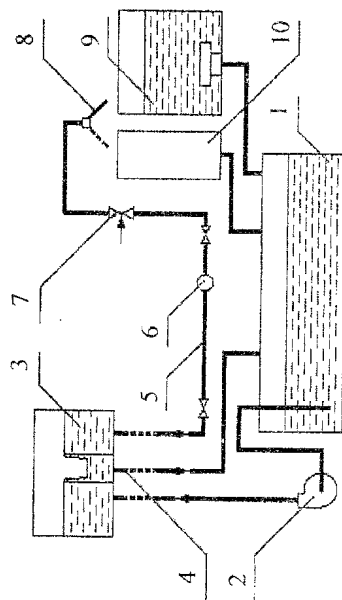


Рис. 29. Схема статической расходомерной установки:
1 — сливная емкость; 2 — насос; 3 — напорный бак;
4 — байпасный трубопровод; 5 — испытательный участок;
6 — поверяемый прибор; 7 — регулирующий вентиль;
8 — перекидное устройство; 9 — мерный бак; 10 — пролетный бак

Работа установки происходит следующим образом. Жидкость из сливной емкости 1 подается насосом 2 в напорный бак, затем проходит через испытательный участок 5 в поверяемый прибор 6, регулирующим вентилем 7, перекидным устройством 8 направляется в пролетный бак 10 и обратно в сливную емкость 1. Регулирующим вентилем устанавливается требуемый расход, после чего срабатывает перекидное устройство. Жидкость поступает в мерный бак 9, и начинается отсчет времени. После заполнения бака срабатывает перекидное устройство, жидкость направляется в пролетный бак, отсчет времени прекращается. Фиксируются количество жидкости в мерном баке и интервал времени.

Таким образом, процесс воспроизведения расхода и его измерение происходит в разные промежутки времени.

В объемных установках количество жидкости, поступившей в бак, определяется по указателю уровня, в массовых — по результатам взвешивания до и после заполнения.

Рассчитывается расход жидкости:
объемный

$$Q_o = \frac{V}{\Delta t}$$

или массовый

$$Q_m = \frac{M}{\Delta t},$$

где V или M — объем или масса жидкости, поступившей в мерный бак;

Δt — интервал времени между срабатываниями перекидного устройства.

Погрешность измерения расхода определяется:

- погрешностью измерения объема или массы;
- погрешностью измерения интервала времени;
- разновременностью срабатывания перекидного устройства;
- непостоянством значения расхода в процессе заполнения мерного бака;
- изменением свойств поверочной среды за время поверки.

Для снижения погрешности объем бака выбирается таким образом, чтобы время заполнения при максимальном расходе было не менее 40...60 с, время срабатывания перекидного устройства 0,01...0,02 с.

Статические расходомерные установки являются наиболее точными устройствами для воспроизведения расхода. Государственные первичные эталоны объемного и массового расхода жидкости — это статические расходомерные установки.

Объемные установки проще, чем массовые, но имеют большую погрешность. Предельная погрешность объемных установок 0,05...0,15 %, массовых 0,03...0,10 %.

В отличие от статических установок в **динамических расходомерных установках** процессы воспроизведения и измерения расхода совмещены во времени. Мерный бак оборудован датчиками уровня (объемные установки) или установлен на тензометрических датчиках (массовые установки). В объемных установках в процессе заполнения бака измеряются объем жидкости между двумя датчиками уровня и соответствующий промежуток времени. В массовых установках можно вести непрерывную запись весового количества жидкости, поступающей в бак, запись времени и определить непрерывные значения расхода.

Погрешность динамических установок больше, чем статических. Она составляет не менее 0,2...0,3 %.

При поверке счетчиков допускается небольшое изменение расхода, обычно в пределах 2 %. Поэтому в поверочной установке может отсутствовать напорный бак, поверочная жидкость подается к испытательному участку непосредственно от насоса или из водопровода.

На рисунке 30 приведена схема **установки для поверки счетчиков воды с мерным баком**.

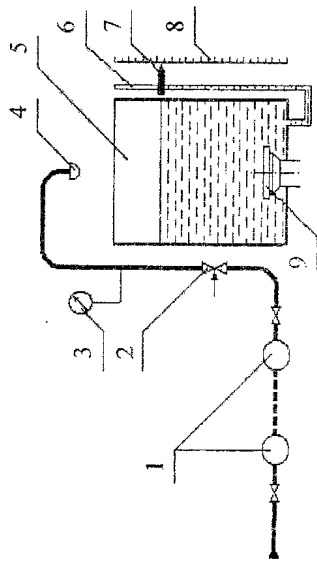


Рис. 30. Схема установки для поверки счетчиков воды с мерным баком:

- 1 — поверяемые счетчики; 2 — регулятор расхода; 3 — указатель расхода; 4 — сопло; 5 — мерный бак; 6 — водомерная трубка; 7 — визир; 8 — шкала; 9 — сливной клапан

Вода из напорного бака, насоса или водопровода поступает в поверяемые счетчики 1. Одновременно могут проходить поверку несколько счетчиков. Требуемый расход устанавливается регулирующим вентилем. При изменении расхода изменяются перепад давления в сужающем устройстве — сопле 4 и давление перед соплом. Значение расхода контролируется по указателю расхода 3, который представляет собой манометр, измеряющий давление воды перед соплом. Шкала указателя отградуирована непосредственно в единицах расхода. Мерный бак 5 изготавливается из стальных листов достаточной толщины для того, чтобы не иметь деформации при заполнении. Форма бака может быть цилиндрической или прямоугольной с постоянным по высоте поперечным сечением.

Бак снабжен водомерной трубкой 6 и реечной шкалой. Водомерная трубка — толстостенная стеклянная трубка с внутренним диаметром не менее 20 мм. Шкала 8 выполнена из коррозионно-стойкого металла. Для устранения паралакса может использоваться визир 7, который перемещается вдоль шкалы. Для слива рабочей жидкости мерный бак снабжается сливным клапаном 9. Сливной клапан представляет собой цилиндрический груз с резиновым торцом. Под действием собственного веса груз прижимается к седлу сливного клапана. Резиновый торец обеспечивает герметичность. Клапан поднимается и опускается с помощью рычажного механизма.

Шкалу мерных баков градуируют с помощью эталонных мер вместимости — эталонных мерников или весовым методом.

Схема установки для проверки камерных счетчиков промышленных жидкостей представлена на рисунке 31. Жидкость из сливной емкости 16 подается насосом 17 к поверяемому счетчику 11. Избыточное количество жидкости через байпасный трубопровод 18 возвращается в сливную емкость. Параметры жидкости перед счетчиком контролируются термометром 12 и манометром 13. В трубопроводе на выходе из счетчиков установлены сужающее устройство 6 для измерения расхода и смотровое стекло 7 для проверки отсутствия пузырьков газа в жидкости. Значение расхода определяется по указателю 8, представляющему собой дифференциальный манометр со шкалой, отрадуированной в единицах расхода.

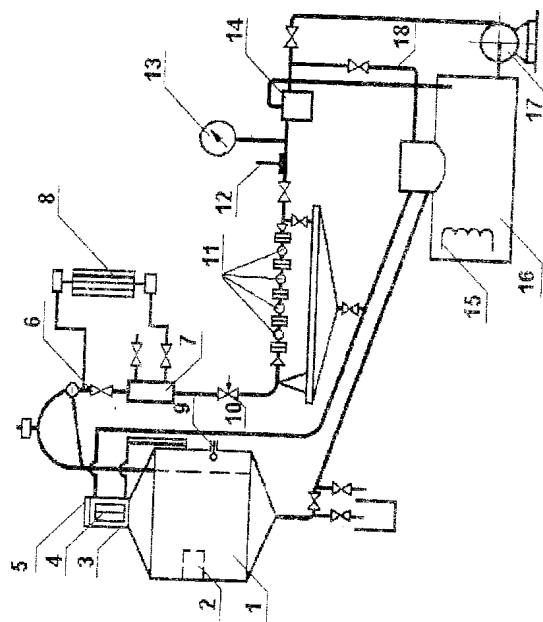


Рис. 31. Схема установки для проверки камерных счетчиков жидкости: 1 — эталонная мера вместимости; 2 — компенсатор вместимости; 3 — горловина; 4 — шкала; 5 — крышка; 6 — насадочный кран (сужающее устройство); 7 — смотровое стекло; 8 — указатель расхода; 9, 12 — термометр; 10 — регулятор расхода; 11 — поверяемый счетчик; 13 — манометр; 14 — фильтр-воздухоотделитель; 15 — нагреватель или охладитель; 16 — сливная емкость; 17 — насос; 18 — байпасный трубопровод

Мерный бак 1 выполнен в виде эталонного жидкостного мерника (эталонной меры вместимости). Для повышения точности отсчета мерник имеет узкую горловину 3 со смотровым стеклом и шкалой 4. Мерник снабжается компенсатором вместимости 2 и термометром 9. Компенсатор вместимости служит для регулирования объема в процессе поверки и градуировки мерника. Он представляет собой цилиндрическое тело, которое перемещается в сальниковых направляющих с помощью винтового механизма. Объем регулируется путем изменения длины цилиндрического тела, находящегося внутри объема мерника. Термометр позволяет измерять температуру жидкости непосредственно в мернике. По показаниям этого термометра и термометра, измеряющего температуру жидкости перед поверяемым счетчиком, рассчитываются соответствующие поправки.

Для предохранения жидкости от испарения мерник закрыт крышкой 5. Трубопровод, соединяющий горловину мерника и сливную емкость, служит для отвода воздуха из мерника при его заполнении и предохраняет от перелива жидкости в мерник.

При поверке высокоточных счетчиков и преобразователей расхода нефти, нефтепродуктов и газового конденсата, в том числе и непосредственно на месте эксплуатации, используются **трубопоршневые установки (ТПУ)**. Они применяются прежде всего для поверки расходоизмерительных устройств, имеющих импульсный выход (турбинных, вихревых, камерных и т.д.). В зависимости от исполнения, методов и средств градуировки и поверки эти установки обеспечивают погрешность измерения объема в пределах 0,05...0,15 %.

На рисунке 32 изображена трубопоршневая установка с жидкостной петлей.

Она состоит из «петли» 1, изготовленной из бесшовной стальной трубы, двух шаровых поршней 2, детекторов-переключателей 3, клапана-манипулятора 4 и электронно-счетного устройства 5. Внутренняя поверхность «петли» покрыта специальным стойким покрытием. Один шаровой поршень выполняет роль вытеснителя жидкости из «петли», второй — функции запорного устройства в клапане-манипуляторе.

Трубопоршневая установка работает следующим образом. ТПУ включается в жидкостную магистраль последовательно с поверяемым счетчиком 6. Под напором жидкости шаровой поршень перемещается в «петлю». При прохождении поршнем первого детектора включается счетное устройство, и начинается отсчет импульсов, поступающих от поверяемого счетчика. В момент прохождения поршнем второго

детектора отсчет импульсов прекращается. Затем шаровой поршень падает в клапан-манипулятор, выталкивает второй шаровой поршень в поток и занимает его положение. Цикл измерений повторяется.

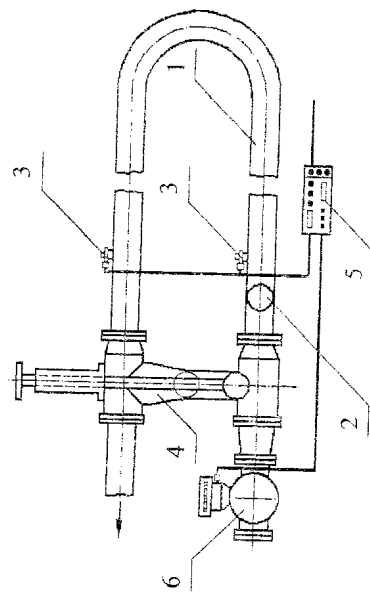


Рис. 32. Схема трубопоршневой установки с жидкостной петлей:

1 — калиброванный участок «петли»; 2 — шаровой поршень;
3 — детектор-переключатель; 4 — клапан-манипулятор;
5 — электронно-счетное устройство; 6 — поверяемый прибор

Объем калиброванного участка петли определяется при помощи эталонных мерников или весов. Рассчитываются соответствующие поправки на температуру и давление рабочей жидкости.

Устройство трубопоршневой установки с гидравлическим приводом приведено на рисунке 33. Основной частью установки является цилиндр 1, в котором находится свободно движущийся поршень 2. Внутри поршня смонтирован тарельчатый клапан 3, который под действием сжатого газа 9 к поршню 5 силового цилиндра 4. Поршень сжатого газа 9 или гидравлического давления 10. Давление сжатого газа обеспечивает закрытие тарельчатого клапана и приводит в движение поршень 2. Гидравлическое давление возвращает поршень 2 в исходное положение и удерживает тарельчатый клапан в открытом положении (режим ожидания).

Положение поршня 2 в цилиндре 1 определяется с помощью оптоэлектронных концевых переключателей. Сигнал вырабатывается в тот момент, когда флажок, укрепленный на измерительном стержне 12 и движущийся синхронно с поршнем 2, проходит мимо щели переключателя и прерывает световой поток. Используется три пере-

ключателя: один, 13, — для определения положения поршня в режиме ожидания, а два, 14 и 15, — для определения вытесненного объема жидкости. Эти сигналы используются для приведения в действие различных таймеров и счетчиков для получения измерительной информации, а также для приведения в действие соответствующих клапанов и элементов системы управления.

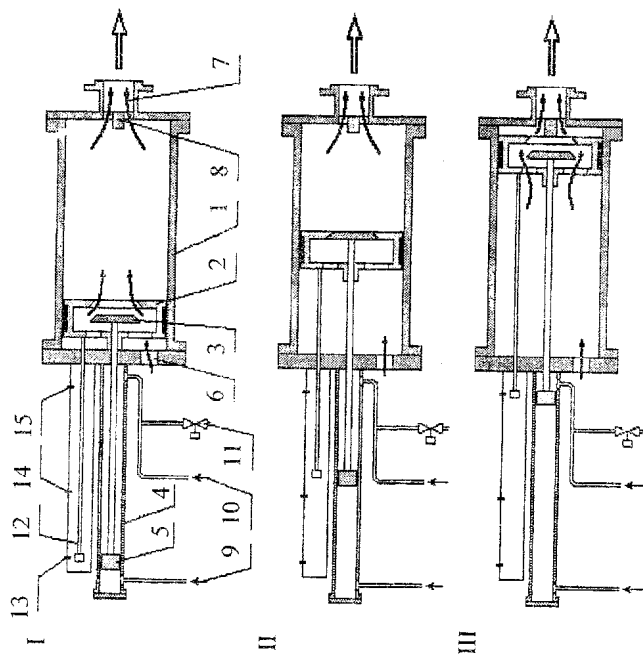


Рис. 33. Трубопоршневая установка с гидравлическим приводом:

I — режим ожидания; II — контрольный рабочий ход;
III — конец рабочего хода;
1 — цилиндр; 2 — поршень; 3 — тарельчатый клапан;
4 — силовой цилиндр; 5 — поршень силового цилиндра;
6, 7 — вход и выход жидкости; 8 — ограничитель;
9 — сжатый газ; 10 — гидравлическое давление;
11 — электромагнитный клапан; 12 — измерительный стержень;
13, 14, 15 — оптоэлектронные концевые переключатели

Для приведения установки в режим ожидания (рис. 33, I) закрывается электромагнитный клапан 11. Гидравлическое давление перемещает поршень силового цилиндра 5, при этом открывается тарельчатый клапан 3 и поршень 2 перемещается в крайнее левое положение.

Жидкость проходит через открытый тарельчатый клапан. После команды пуска открывается электромагнитный клапан, снижается гидравлическое давление, действующее на поршень 5 сжатого газа цилиндра 5. Под действием давления сжатого газа поршень 5 закрывает тарельчатый клапан 3. Поршень 2 с закрытым клапаном 3 движется синхронно с потоком жидкости, проходящей через установку (рис. 33, II). По мере движения поршня флажок измерительного стержня 12 проходит через переключатель начала рабочего цикла 14, а затем переключатель окончания рабочего хода 15.

После окончания рабочего хода (рис. 33, III) закрывается электромагнитный клапан 11, и установка приводится в режим ожидания. Для защиты от прерывания потока жидкости в выходном фланце установки имеется ограничитель 8, который принудительно открывает тарельчатый клапан при отсутствии команды на окончание рабочего цикла. Таким образом обеспечивается непрерывный поток жидкости через установку.

Трубопоршневые установки с гидравлическим приводом имеют высокие метрологические характеристики. Благодаря сравнительно небольшому размеру они часто выполняются передвижными. Их легко можно устанавливать на грузовиках или прицепах для поверки и калибровки расходоизмерительных устройств непосредственно на месте эксплуатации.

Измерение количества жидкости в эталонных установках с использованием объемных или весовых мерных устройств при больших расходах требует больших размеров этих устройств и приводит к их высокой стоимости. Установки с эталонными расходоизмерительными устройствами имеют меньшие габаритные размеры и проще в эксплуатации. Принципиальная гидравлическая схема установки с тремя эталонными преобразователями расхода приведена на рисунке 34.

Необходимый напор создается насосом с регулируемой частотой вращения 2 из накопительного бака 1. Демпфирование пульсаций, создаваемых насосом, и стабилизация расхода обеспечиваются ресивером 3, который заполнен сжатым газом. На испытательном участке 4 монтируются поверяемые приборы 5. Действительное значение расхода количества определяется по эталонным приборам 6, которые обеспечивают измерение в разных диапазонах расхода. Регулирование и установление поверочных расходов производятся вентилями 7. В зависимости от требуемого расхода запорными вентилями 8 в гидравлический контур включается тот или иной эталонный преобразователь расхода.

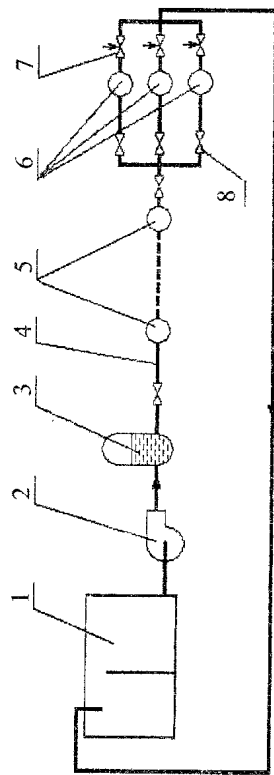


Рис. 34. Схема установки с эталонными расходоизмерительными устройствами:

- 1 — накопительный бак; 2 — насос; 3 — ресивер;
- 4 — испытательный участок; 5 — поверяемые приборы;
- 6 — эталонные преобразователи расхода;
- 7 — регулирующий вентиль; 8 — запорный вентиль

Установки с эталонными расходоизмерительными устройствами в силу своих малых размеров и низкого веса могут использоваться для поверки непосредственно на месте эксплуатации без демонтажа поверяемого прибора. Схема переносной установки для поверки счетчиков воды приведена на рисунке 35.

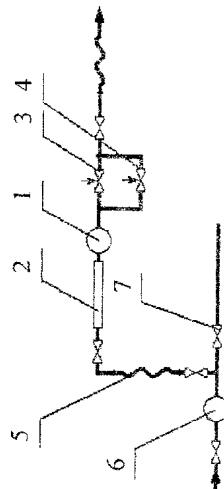


Рис. 35. Схема установки для поверки счетчиков воды на месте эксплуатации:

- 1 — эталонный счетчик; 2 — выпрямитель потока;
- 3, 4 — регулирующие вентили; 5 — гибкий рукав;
- 6 — поверяемый счетчик; 7 — запорный вентиль

Поверочная установка состоит из эталонного счетчика 1, выпрямителя потока 2 для формирования требуемого распределения скорости в сечении перед эталонным преобразователем расхода, регулирующих вентилей грубой 3 и тонкой 4 регулировки.

Установка гибкими рукавами 5 подсоединяется к трубопроводу, в котором установлен поверяемый прибор 6. Подсоединение производится с использованием запорных вентилей 7, как показано на рисунке 34, или непосредственно к раздаточному крану водопровода (при поверке счетчиков квартирного учета). При поверке вода последовательно проходит через поверяемый и эталонный счетчики и сливается в канализацию.

Как уже говорилось, установки с эталонными расходоизмерительными устройствами имеют меньшие размеры и проще в эксплуатации по сравнению с установками, имеющими объемные или весовые мерные устройства. Это преимущество особенно важно в установках для больших расходов. Недостатком таких установок является необходимость поверки эталонных приборов на других эталонных расходомерных установках.

Для «больших» расходов могут применяться установки, включающие в себя исходное эталонное средство и несколько одинаковых эталонных расходоизмерительных устройств. Схема такой установки приведена на рисунке 36.

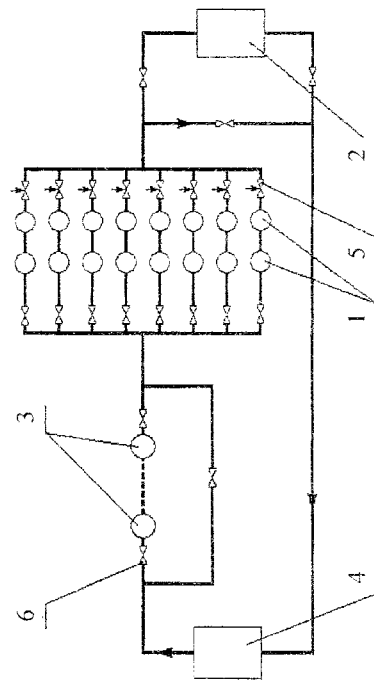


Рис. 36. Принципиальная схема установки для воспроизведения «больших» расходов:
1 — эталонный прибор; 2 — исходное эталонное средство;
3 — поверяемые приборы; 4 — напорное устройство;
5 — регулирующий вентиль; 6 — запорный вентиль

Эталонные приборы 1 размещены в параллельных трубопроводах. Для постоянного контроля состояния эталонных приборов в каждом трубопроводе последовательно установлено по два эталонных прибора. Эталонные приборы 1 последовательно градуируются и по-

веряются непосредственно в составе установки с использованием исходного эталонного средства 2. Расход через эталонные приборы регулируется и устанавливается вентилями 5. В качестве исходного эталонного средства могут использоваться эталонные мерник и часы, трубопоршневая установка и т.д. Напорное устройство 4 включает в себя емкость с поверочной средой, насос и устройство стабилизации расхода (напорный бак или ресивер со сжатым газом).

Поверяемые приборы 3 установлены в гидравлический контур последовательно с эталонными приборами 1. Поверка при малых расходах может производиться с использованием исходного эталонного средства 2. При больших расходах в гидравлический контур запорными вентилями 6 подключается требуемое количество эталонных приборов 1.

В качестве эталонных возможно применение серийно выпускаемых приборов. При этом они могут использоваться в составе установки только при одном расходе, близком или равном верхнему пределу измерения. Измерение несколькими параллельно работающими приборами позволяет уменьшить случайную погрешность. При числе n одинаковых приборов случайная погрешность в $\sqrt{n}$ раз меньше случайной погрешности каждого прибора. Это обстоятельство и работа каждого прибора на одном расходе позволяют получить необходимую точность поверочной установки.

Поверка и калибровка расходоизмерительных устройств, предназначенных для измерения больших расходов жидкостей, при использовании традиционных схем установок приводит к необходимости применять, кроме больших емкостей, также и насосы большой мощности. Снижение мощности насосов обеспечивается в установке, в которой совмещены напорный и мерный баки (рис. 37).

Основными элементами установки являются напорная башня 1, имеющая калиброванный объем между датчиками уровня 5 и 6, регулирующей вентиль для установки калибровочного расхода 3 и сливная емкость 4.

Перед калибровкой напорная башня 1 заполняется водой с любом расходом. После заполнения башни начинается процесс калибровки. Открываются вентили в гидравлической магистральной, и поток воды проходит через калибруемые приборы 2. Когда уровень воды в башне снижается до датчика уровня 5, начинается отсчет времени и импульсов от калибруемых приборов. После того как уровень воды снижается до датчика уровня 6, отсчет прекращается. Постоянство расхода в процессе калибровки обеспечивается регулированием дав-

ления наддува напорной башни. Снижение напора при снижении уровня воды в башне компенсируется соответствующим увеличением давления наддува.

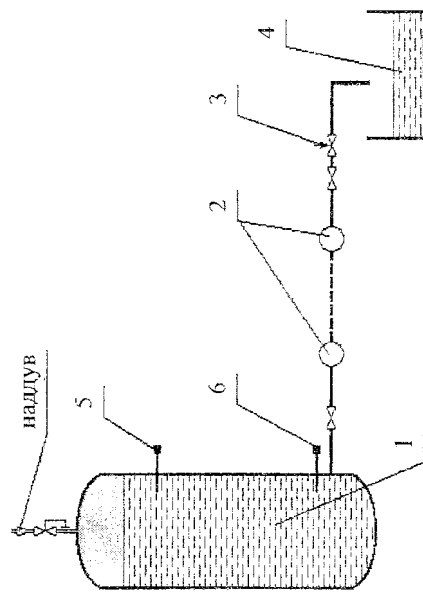


Рис. 37. Принципиальная схема эталонной установки для больших расходов:

1 — напорная башня; 2 — калибруемые приборы; 3 — регулируемый вентиль; 4 — сливная емкость; 5, 6 — датчики уровня

3.3. Газовые расходомерные установки

Грузокольцевые установки для поверки газовых расходоизмерительных устройств схематично изображены на рисунке 38.

Основной частью установки является кольцевой мерник, выполненный в виде пустотелого кольца (рис. 38а) или спиральной трубы прямоугольного сечения (рис. 38б). Мерник может поворачиваться вокруг центральной оси и частично заполнен водой 2, которая создает жидкостный затвор. Мерник устанавливается на подшипниках качения и приводится во вращение грузом 3, подвешенным на нити и перекинутым через блок.

Пустотелое кольцо (рис. 38а) имеет перегородку, разделяющую его на две полости с разным давлением P_1 и P_2 . Перепад давления $P_1 - P_2$ уравнивается гидростатически за счет разности уровней в полостях II и I. Перепад давления воздействует на перегородку и создает вращательный момент, который уравнивает момент, создаваемый грузом. При открытом вентиле 5 воздух из полости I проходит через поверяемый прибор 4 и затем выходит наружу или возвращается в мерник, как показано на рисунке 38а.

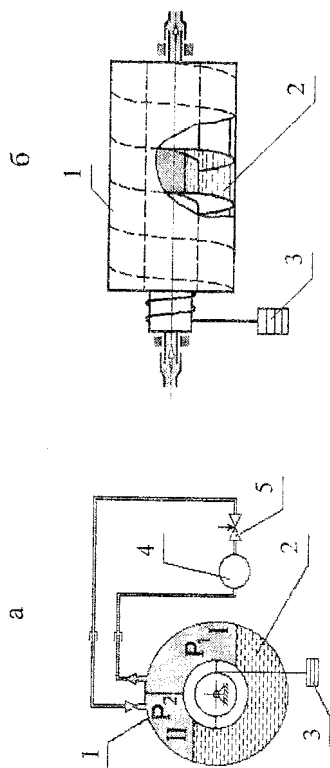


Рис. 38. Грузокольцевые установки:
а — схема установки с кольцевым мерником;
б — спиральный мерник;
1 — мерник; 2 — жидкость; 3 — груз;
4 — поверяемый счетчик; 5 — регулирующий вентиль

В установке со спиральным мерником (рис. 38б) при вращении мерника 1 под действием груза 3 вода 2 протекает по спиральному каналу, вытесняет воздух в трубопровод, далее в испытательный участок и поверяемый прибор.

Расход газа через установку

$$Q_0 = \omega V_1,$$

где ω — угловая скорость вращения барабана;

V_1 — объем кольцевого канала, соответствующий повороту на 1° .

Расход газа регулируется вентилем 5, установленным в трубопроводе. Диапазон измерений расхода может изменяться массой груза. Статическое давление определяется массой груза и автоматически поддерживается постоянным.

Погрешность воспроизведения расхода определяется погрешностями калибровки витового канала, измерения угловой скорости вращения, непостоянством трения в подшипниках и сальниковых уплотнениях.

Предельная погрешность грузокольцевых установок 0,15...0,25 %. Расход газа до $20 \text{ м}^3/\text{ч}$.

Для поверки газовых расходоизмерительных устройств при малых расходах могут использоваться также установки с цилиндрическим мерником (рис. 39).

Колокольные мерники применяются для поверки счетчиков газа при расходах до $1000 \text{ м}^3/\text{ч}$, давление воздуха до 100 Па. Погрешность измерения объема в пределах $0,05 \dots 0,2 \%$, измерения расхода $0,15 \dots 0,4 \%$.

Большие расходы газа воспроизводятся трубопоршневыми установками. Схема **газовой трубопоршневой установки** приведена на рисунке 41.

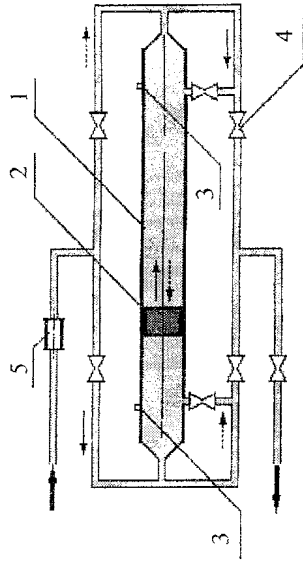


Рис. 41. Газовая трубопоршневая установка:

1 — калиброванный участок трубы; 2 — поршень;
3 — детектор-переклочатель; 4 — клапан; 5 — поверяемый прибор

Основными элементами установки являются калиброванная труба с перемещающимся в ней поршнем, детекторы перемещения, клапаны, при переключении которых происходит изменение направления движения газа и поршня, электронно-счетное устройство.

Газ проходит через поверяемый прибор 5, поступает в калиброванную трубу 1 и перемещает поршень 2. При прохождении поршнем первого детектора 3 начинается отсчет импульсов, поступающих с поверяемого прибора, и отсчет времени. При прохождении поршнем второго детектора 3 отсчет прекращается. После того как поршень займет в трубе крайнее правое положение, происходит переключение клапанов 4, и изменяется направление движения газа и поршня на противоположное.

Калиброванный участок трубы между детекторами располагается таким образом, чтобы движение поршня на этом участке было равномерным без разгона и торможения. За счет этого обеспечивается постоянство расхода.

Предельная погрешность наиболее совершенных газовых трубопоршневых установок не превосходит $0,1 \dots 0,2 \%$.

Для поверки газовых расходомеров и счетчиков широко используются **установки с эталонными соплами**. Такие установки могут

быть двух типов: с соплами, работающими в докритическом и критическом режимах.

Расход газа через сопло при докритическом режиме зависит от его проходного сечения, давления и температуры газа перед соплом и перепада давлений на нем. С ростом перепада давлений увеличиваются скорость и расход газа. Критический режим наступает тогда, когда скорость в горловине сопла достигнет скорости звука.

Дальнейшее увеличение перепада давления уже не приводит к увеличению скорости в горловине сопла. Таким образом, при критическом режиме расход газа через сопло зависит только от его проходного сечения и параметров газа перед ним. Расход не зависит от давления после сопла. Поэтому, несмотря на более высокие затраты энергии, установки с критическими соплами более широко применяются, чем установки с докритическими соплами.

Для воздуха критический режим наступает при отношении давлений в горловине и на входе в сопло в диапазоне $0,528 \dots 0,592$. При этом отношение давлений после и до сопла в критических соплах Вентури составляет $0,83 \dots 0,87$.

Схемы установок с **критическими соплами** приведены на рисунке 42. На рисунке 42а приведена схема установки, работающей при избыточном давлении. Сжатый газ от источника 4 поступает в ресивер 5, где гасятся пульсации давления, возникающие в источнике. Требуемое давление на входе в критические сопла 1 поддерживается регулятором давления 6. Расход газа, поступающий к поверяемым приборам, изменяется путем открытия электромагнитных клапанов 2 и подключения соответствующего сопла или нескольких сопел, а также изменением давления перед соплами.

Схема установки, работающей при разрежении, приведена на рисунке 42б. Воздух из помещения с давлением p , температурой T и относительной влажностью ϕ поступает в поверяемый прибор 3. Пульсации давления и расхода, возникающие при прохождении воздуха через поверяемый прибор, гасятся в емкости 9. Необходимое разрежение для обеспечения критического режима течения воздуха через сопло обеспечивается вакуум-компрессором 8.

Сопла градуируются индивидуально на эталонных установках высокой точности. Погрешность градуировки в зависимости от точности эталонной установки, на которой производилась градуировка, может быть в пределах $0,08 \dots 0,2 \%$. Погрешность воспроизведения расхода эталонной установкой с критическими соплами с учетом погрешностей измерения давления температуры составляет $0,2 \dots 0,5 \%$.

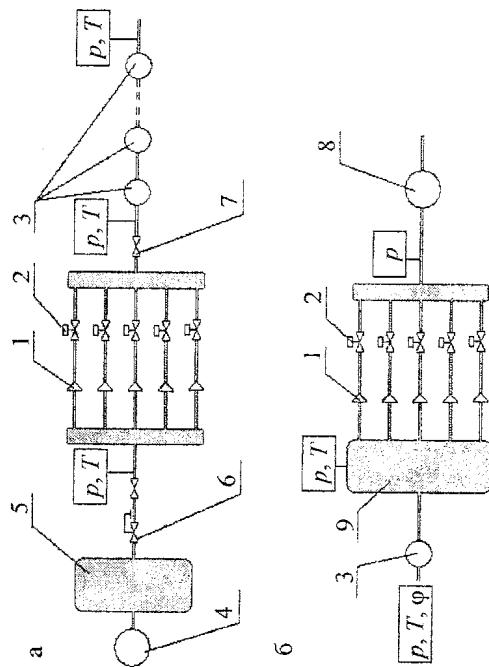


Рис. 42. Схемы установок с критическими соплами:

а — схема с избыточным давлением; б — схема с разрежением;
1 — сопло; 2 — электромагнитный клапан; 3 — поверяемые приборы;
4 — источник сжатого газа; 5 — ресивер; 6 — регулятор давления;
7 — запорный вентиль; 8 — вакуум-компрессор; 9 — емкость

Схема поверочной установки с докритическими соплами показана на рисунке 43. Воздух из помещения подается вентилем 3, проходит через поверяемый прибор 2, поступает в ресивер 5 и через сопла 1 выходит в помещение. Требуемый расход воздуха обеспечивается установкой необходимого числа сопел 1 и регулируемыми вентилями 4.

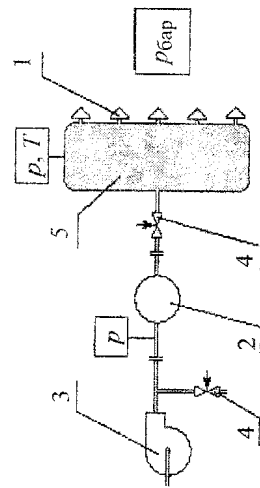


Рис. 43. Схема поверочной установки с докритическими соплами:

1 — сопло; 2 — поверяемый прибор; 3 — вентиль;
4 — регулирующий вентиль; 5 — ресивер

Расход воздуха через докритическое сопло определяется по его паспортным данным и измеренным значениям избыточного давления, температуры воздуха в ресивере и барометрического давления. При расчете действительного значения объемного расхода через поверяемый прибор учитывается поправка на разницу давлений перед поверяемым прибором и в ресивере перед соплами.

На рисунке 44 приведена схема установки для поверки бытовых счетчиков газа непосредственно на месте эксплуатации без демонтирования счетчика. Установка состоит из пневматического и электронного блоков. В состав пневматического блока входят эталонный струйный счетчик газа 1 и регулирующие вентили 2. Установка подсоединяется к газопроводу гибкими шлангами 3 между поверяемым счетчиком 4 и газовой плитой 6.

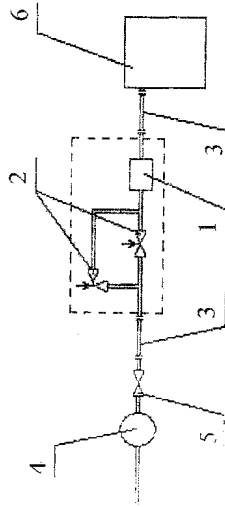


Рис. 44. Схема установки для поверки бытовых газовых счетчиков на месте эксплуатации:

1 — эталонный счетчик газа; 2 — регулирующие вентили;
3 — соединительные шланги; 4 — поверяемый счетчик;
5 — запорный вентиль; 6 — газовая плита

При поверке открывается вентиль на газопроводе 5. При определении погрешности на максимальном расходе зажигаются все конфорки и духовка газовой плиты. Электронный блок регистрирует объем газа, прошедшего через эталонный счетчик, и число импульсов от поверяемого счетчика (если поверяемый счетчик имеет электрический импульсный выход).

Струйный счетчик имеет широкие пределы измерения, что позволяет проводить поверку в диапазоне расхода газа от $0,03$ до $6,0 \text{ м}^3/\text{ч}$. Погрешность установки $0,5\%$.

При использовании в качестве эталонных счетчиков другого типа, например, ротационно-потокового, для обеспечения такого диапазона измерения с указанной погрешностью в состав установки входят два счетчика с разными пределами измерений.

4. ПОВЕРКА И КАЛИБРОВКА РАСХОДОИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ

4.1. Поверочные схемы

Поверочные схемы определяют порядок, средства и методы передачи единицы измерения от эталона рабочим средствам измерений.

Государственные поверочные схемы для средств измерений расхода приведены в государственных стандартах:

- ГОСТ 8.142-75 для средств измерений массового расхода жидкости;
- ГОСТ 8.145-75 для средств измерений объемного расхода жидкости;
- ГОСТ 8.143-75 для средств измерений объемного расхода газа;
- ГОСТ 8.369-79 для средств измерений массового расхода газа;
- ГОСТ 8.373-80 для средств измерений объемного расхода нефтепродуктов;
- ГОСТ 8.374-80 для средств измерений объемного расхода воды.

В состав государственных поверочных схем средств измерений расхода входят эталоны, рабочие эталоны и рабочие средства измерений.

Во главе схем находится **государственный первичный или специальный эталон**, предназначенный для хранения и воспроизведения единицы расхода жидкости или газа и передачи единицы расхода нижестоящим в поверочной схеме средствам измерений. Государственный эталон — это расходомерная установка с косвенным методом измерения расхода и с наивысшей в стране точностью.

Вторичные эталоны служат для передачи единицы расхода от государственного эталона рабочим эталонам и рабочим средствам измерений высокой точности. Вторичные эталоны — это наборы высочайших расходомеров или расходомерные установки высокой точности.

Рабочие эталоны расхода представляют собой расходомерные установки или наборы эталонных расходомеров и предназначены для поверки, калибровки и градуировки рабочих средств измерений. В состав поверочных схем помимо рабочих эталонов расхода входят рабочие эталоны, заимствованные из других поверочных схем. К рабочим эталонам, заимствованным из других поверочных схем, относятся эталонные жидкостные мерники, эталонные гири и весы, эталонные электронно-счетные частотомеры, эталонные термометры и др. Эти эталонные средства служат для аттестации рабочих эталонов расхода методом косвенных измерений.

Рабочие средства измерений — это расходомеры жидкости и газа. Общее требование к рабочим средствам измерений расхода, предъявляемое во всех поверочных схемах, — **относительная погрешность измерения расхода не должна превышать 5 %**.

Соотношение погрешности используемых при поверке рабочих эталонов и поверяемых рабочих средств измерения **не должно превышать 1:3**.

Государственные первичные эталоны объемного и массового расхода жидкости представляют собой высокоточные статические расходомерные установки. Погрешность воспроизведения государственным первичным эталоном единицы массового расхода значительно меньше, чем единицы объемного расхода. Тем не менее, так как до настоящего времени массовые расходомеры жидкости не находят широкого применения, чаще используются средства и методы, относящиеся к поверочной схеме объемного расхода жидкости.

В практике поверки и калибровки средств измерения расхода газа чаще применяются средства и методы, принадлежащие к поверочной схеме массового расхода. Это вызвано большой сложностью рабочих эталонов объемного расхода газа требуемой точности.

Поверочная схема для средств измерения (счетчиков) объема жидкости (ГОСТ 8.510-84) отличается по структуре от поверочных схем измерения расхода. Во главе схемы находится установка высшей точности для воспроизведения единицы объема счетчиками жидкости. Она представляет собой набор эталонных средств измерения: эталонных мерников, эталонных гирь, термометров и т.д. Поверочная схема имеет несколько ветвей передачи единицы объема от установок высшей точности рабочим эталонам и рабочим средствам измерений определенных категорий веществ. Установлены конкретные значения пределов допускаемых погрешностей для определенных типов счетчиков.

Соотношение погрешности рабочих эталонов и рабочих средств измерения так же, как и в поверочных схемах для средств измерений расхода, не должно превышать 1:3. Исключение составляет поверка высокоточных счетчиков нефти, нефтепродуктов, газового конденсата и сжиженного газа с пределом допускаемого значения погрешности 0,15 и 0,25 %. При таких точностях рабочих средств измерения реализация соотношения 1:3 затруднена из-за сложности и высокой стоимости эталонных трубопроводных установок высокой точности, которые применяются в требуемом диапазоне расходов.

4.2. Поверка проливным методом

Основным методом поверки и калибровки является проливной метод с использованием эталонных расходомерных установок. Такой метод применим для всех типов расходоизмерительных устройств.

Средства поверки. Основным средством поверки является поверочная проливная установка. Требования к ее точности определяются соответствующей поверочной схемой. При поверке расходомеров и большинства типов счетчиков погрешность поверочной установки не должна превышать $1/3$ допускаемой погрешности поверяемого устройства. При этом погрешность поверяемого устройства определяется без учета погрешности поверочной установки.

При поверке и калибровке высокоточных устройств с допускаемой погрешностью менее $0,3\%$ соотношение погрешностей может быть больше $1:3$. В этих случаях при определении погрешности рабочих средств измерения необходимо учитывать погрешность поверочной установки.

В средства поверки входят также гидравлический пресс, эталонные манометры, термометры, барометры, гигрометры и т.д. Перечень средств поверки конкретных типов расходоизмерительных устройств и требования к ним приводятся в соответствующих нормативных документах (государственных стандартах или методических указаниях).

Поверочная среда. Естественно, что лучше проводить поверку и калибровку на рабочей среде. Однако из-за особенностей рабочих сред это не всегда возможно или целесообразно по экономическим соображениям. Поэтому в качестве поверочных сред используются наиболее доступные жидкости и газы. Обычно при поверке жидкостных расходоизмерительных устройств нормальной и низкой точности используется вода, газовых — воздух. Поверка высокоточных устройств проводится как на рабочих средах, так и средах-заменителях, близких по своим свойствам к рабочим средам. В качестве жидкостей-заменителей используются керосин, различные масла и т.д.

Если особенности рабочей жидкостью и характер потока при эксплуатации оказывают значительное влияние на результат измерения и не могут быть полностью реализованы в поверочной установке, поверка должна проводиться непосредственно на месте эксплуатации.

Требования к условиям поверки приводятся в соответствующей нормативной документации. Нормируются значения температуры поверочной среды и ее изменение в процессе поверки, значения температуры, влажности и давления окружающего воздуха, напряжения

и частоты питания и т.д. Номинальные значения параметров и допускаемые отклонения определяются особенностями конструкции, точностью прибора, условиями его эксплуатации, особенностями поверочной среды.

При поверке выполняются следующие операции:

- внешний осмотр;
- проверка электрической изоляции (определение сопротивления и проверка электрической прочности) при наличии электрических цепей;
- проверка герметичности преобразователя расхода;
- опробование;
- определение метрологических характеристик.

При внешнем осмотре должно быть установлено следующее:

- наличие паспорта и комплектность по паспорту;
- маркировка;
- отсутствие видимых повреждений и дефектов, препятствующих нормальной работе;
- соответствие требованиям технической документации;
- наличие неповрежденных пломб и оттисков поверительного клейма органов метрологической службы;
- правильность подготовки устройства к поверке.

Проверка изоляции электрических цепей проводится в соответствии с требованиями технической документации.

Для проверки герметичности преобразователя расхода в его рабочей полости создают давление, значение которого указано в технической документации или на фирменной табличке. Результаты проверки считаются удовлетворительными, если в течение времени, указанного в технической документации, обычно в пределах $5-15$ мин, не понижается давление и визуально не наблюдаются микротечи.

При опробовании проверяется функционирование устройства без определения метрологических характеристик. Функционирование расходомера проверяют путем плавного увеличения расхода до значения, близкого к верхнему пределу измерения, и плавного уменьшения расхода до нуля. Стрелка измерительного прибора (показания цифрового отсчетного устройства, выходной сигнал) должна плавно перемещаться (изменяться).

При опробовании счетчиков подают расход. Контролируют снабжение счетчика, проверяют соответствие указателей разового и суммарного учета.

Определение метрологических характеристик является основной и наиболее трудоемкой операцией поверки. Методика опреде-

ния метрологических характеристик определяется особенностями поверяемого устройства (точностью, характером зависимости выходного сигнала от расхода и т.д.). Конструкция и параметры поверочной установки также могут оказывать влияние.

Определение метрологических характеристик расходомеров

Основную погрешность определяют сравнением результатов измерения эталонной расходомерной установкой и поверяемым устройством не менее чем при трех расходах, два из которых близки к нижнему и верхнему пределам измерения. При линейной зависимости выходного сигнала от расхода значение третьего расхода соответствует середине диапазона измерения. При поверке расходомеров высочайшей точности и нелинейной зависимости выходного сигнала от расхода число расходов может быть больше трех. Значения и количество поверочных расходов определяются характером этой зависимости.

Число измерений поверяемым расходомером и поверочной установкой при каждом из этих расходов может быть от одного до трех и определяется особенностями поверяемого расходомера.

В зависимости от того, каким образом нормирована погрешность, рассчитывают значения приведенной γ или относительной δ погрешности:

$$\gamma = \frac{Q_n - Q_z}{Q_{\max}} 100;$$

$$\delta = \frac{Q_n - Q_z}{Q_z} 100,$$

где Q_n — значение расхода, определенное по показаниям поверяемого расходомера или по выходному сигналу поверяемого преобразователя расхода;

Q_z — значение расхода, определенное по поверочной установке; $Q_{\max}$ — значение расхода, соответствующее верхнему пределу измерения поверяемого расходомера или преобразователя расхода.

Расходомер или преобразователь расхода признается годным, если для каждого из измерений полученные значения погрешностей меньше или равны допускаемым:

$$|\gamma| \leq \gamma_d; |\delta| \leq \delta_d,$$

где γ_d и δ_d — допускаемые значения приведенной и относительной погрешности, определяемые в соответствии с технической документацией.

При поверке расходомеров, у которых нормированы систематическая составляющая основной погрешности и среднеквадратическое отклонение случайной составляющей погрешности, при каждом измерении расхода поверочной установкой производится несколько, обычно не менее пяти, измерений поверяемым расходомером. Рассчитываются значения систематической составляющей погрешности и среднеквадратической случайной погрешности:

$$\gamma_c = \frac{\bar{Q}_n - \bar{Q}_z}{Q_{\max}} 100;$$

$$\sigma_\gamma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Q_{ni} - \bar{Q}_n)^2}{n-1} \frac{100}{Q_{\max}}}$$

или

$$\delta_c = \frac{\bar{Q}_n - \bar{Q}_z}{Q_z} 100;$$

$$\sigma_\delta = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Q_{ni} - \bar{Q}_n)^2}{n-1} \frac{100}{Q_z}},$$

где γ_c и δ_c — приведенное и относительное значение систематической составляющей погрешности;

σ_γ и σ_δ — приведенное и относительное значения среднеквадратической погрешности;

$\bar{Q}_n$ и $\bar{Q}_z$ — средние арифметические значения расхода, рассчитанные по результатам измерений расхода поверяемым расходомером и поверочной установкой,

$$\bar{Q}_z = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Q_{zi},$$

$$\bar{Q}_n = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m Q_{nj},$$

Q_{ni} — результат i -го измерения расхода поверяемым расходомером; Q_{zj} — результат j -го измерения расхода поверочной установкой;

n — число измерений поверяемым расходомером;
 m — число измерений поверочной установкой.

Погрешность расходомера рассчитывается как сумма систематической и случайной составляющих:

$$\gamma = \gamma_c \pm t_\alpha \sigma_\gamma;$$

$$\delta = \delta_c \pm t_\alpha \sigma_\delta,$$

где t_α — квантили распределения Стюдента, который выбирается в зависимости от числа измерений n и вероятной вероятности P по ГОСТ 8.207-76. Если значение вероятной вероятности не огорено технической документацией, принимается $P = 0,95$.

Методика поверки ротаметров отличается от приведенной выше. У ротаметров помимо основной погрешности нормируется также и вариация показаний. Поэтому на отметках условной шкалы, указанных в технической документации, выполняются два измерения поверочной установкой: при плавном увеличении и при плавном уменьшении расхода.

Рассчитываются два значения погрешности для каждой поверочной отметки. Кроме погрешности для каждой поверяемой отметки рассчитывается значение вариации в:

$$v = |\gamma_1 - \gamma_2|,$$

где γ_1 и γ_2 — значения погрешностей, полученных на данной отметке шкалы при поверке со стороны меньших и больших значений расхода.

Определение метрологических характеристик счетчиков

Основная погрешность определяется не менее чем при трех расходах, охватывающих диапазон измерения. Конкретные значения поверочных расходов определяются характером зависимости коэффициента преобразования от расхода. Число измерений, проводимых при одном расходе, зависит от допускаемой погрешности поверяемого счетчика. Для каждого из расходов определено минимальное количество измеримой среды, которое должно пройти через счетчик при поверке.

При поверке **счетчиков воды** может определяться основная или среднеинтегральная погрешность.

Основная погрешность определяется при трех расходах: номинальном, переходном и минимальном. При каждом расходе производится одно измерение поверяемым счетчиком и эталонным средством.

Среднеинтегральная погрешность определяется по количеству воды, прошедшей через счетчик при пяти расходах. При каждом расходе через счетчик пропускают объем воды V_i , соответствующий весовому коэффициенту, присвоенному данному расходу.

$$V_i = P_i V_{\text{общ}},$$

где P_i — весовой коэффициент;

$V_{\text{общ}}$ — общий объем воды, прошедшей через счетчик при поверке.

Основная и среднеинтегральная погрешности счетчика δ рассчитываются по формуле

$$\delta = \frac{V_c - V_3}{V_3} 100,$$

где V_c — объем, зарегистрированный поверяемым счетчиком;
 V_3 — объем, зарегистрированный эталонным средством (эталонной мерой вместимости, эталонным счетчиком).

При поверке счетчиков промышленных жидкостей и счетчиков газа плотность поверочной среды в эталонной мере вместимости может отличаться от плотности перед поверяемым счетчиком. Это отличие учитывается соответствующими поправочными коэффициентами.

При поверке **камерных счетчиков жидкости** в соответствии с ГОСТ 8.451-81 производятся измерения при трех расходах: наименьшем, номинальном и наибольшем. При поверке счетчиков класса точности 0,5 и 1,0 при каждом расходе проводится не менее двух измерений, класса точности 0,25 — не менее трех. За погрешность принимают наибольшее значение, полученное при измерениях.

Вводится поправка на изменение плотности жидкости за счет различия температуры в эталонной мере вместимости и перед счетчиком. Формула для расчета погрешности δ имеет следующий вид:

$$\delta = \left(\frac{V_c - V_3}{V_3} + \beta(t_m - t_c) \right) 100,$$

где β — коэффициент объемного расширения жидкости;

t_m — температура жидкости перед поверяемым счетчиком;

t_c — температура жидкости в эталонной мере.

Если температура жидкости значительно отличается от нормальной, при расчете погрешности дополнительно вводится поправка, учитывающая изменение объема эталонной меры.

$$\delta = \left(\frac{V_c - V_3}{V_3} + \beta(t_m - t_c) + 3\alpha(20 - t_m) \right) 100,$$

где α — коэффициент линейного расширения материала эталонной меры вместимости.

При поверке счетчиков методом измерения массы объем жидкостей, прошедшей через счетчик, определяется по формуле

$$V_c = 1,001 \frac{M}{\rho},$$

где M — масса жидкости, определенная по шкале весов;

1,001 — коэффициент, учитывающий поправку на взвешивание в воздухе;

ρ — плотность жидкости при рабочей температуре, измеренной непосредственно у счетчика.

В соответствии с ГОСТ 8.324–2002 при поверке механических **счетчиков газа** (тахометрических, диафрагменных, барабанных) погрешность определяется не менее чем при трех расходах. В это число обязательно должны входить наибольший расход $Q_{\max}$ и наименьший расход $Q_{\min}$. Если в документации на счетчик указано только значение $Q_{\max}$, то $Q_{\min}$ для диафрагменных и барабанных счетчиков принимают равным 5 % $Q_{\max}$, а для тахометрических 10 % $Q_{\max}$.

При поверке счетчиков, имеющих электронную корректировку выходного сигнала (линеаризация характеристики, активные фильтры и т.д.), погрешность определяют не менее чем при семи расходах, с обязательным включением $Q_{\max}$ и $Q_{\min}$.

Основную погрешность счетчика δ вычисляют по формуле

$$\delta = \frac{V_{сч} - V_3}{V_3} 100 - \Delta,$$

где $V_{сч}$ — объем воздуха, измеренный поверяемым счетчиком;

V_3 — объем воздуха, измеренный поверочной установкой;

Δ — поправка, определяемая разницей давлений в поверяемом счетчике и эталонном средстве поверочной установки.

$$\Delta = \frac{\Delta p V_{сч}}{\rho V_3} 100,$$

где $\Delta p = p - p_{сч}$ — разность значений абсолютных давлений в эталонном средстве поверочной установки p и поверяемом счетчике $p_{сч}$.

При каждом значении расхода погрешность определяют до трех раз. Если определенная по результатам первого измерения основная погрешность не превышает допускаемую, повторные измерения не проводят. В противном случае измерения повторяют, и за результат принимают среднее арифметическое из полученных значений.

Потери давления на поверяемом счетчике определяют при наибольшем расходе воздуха.

В тех случаях, когда погрешность счетчика определяется как сумма **систематической и случайной составляющих**, при каждом поверочном расходе проводится несколько (не менее пяти) измерений поверяемым счетчиком и эталонной установкой.

Рассчитываются систематическая δ_c и случайная δ составляющие погрешности:

$$\delta_c = \frac{\bar{V}_c - \bar{V}_3}{\bar{V}_3} 100;$$

$$\tilde{\delta} = t_\alpha \sigma_\delta,$$

$$\sigma_\delta = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (V_{ci} - \bar{V}_c)^2}{n-1}} \frac{100}{\bar{V}_3},$$

где

$\bar{V}_c$ и $\bar{V}_3$ — средние арифметические значения объема, зарегистрированные поверяемым счетчиком и эталонным средством,

$$\bar{V}_c = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n V_{ci}, \quad \bar{V}_3 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n V_{3i},$$

n — число измерений;

V_{ci} и V_{3i} — результаты i -го измерения поверяемым счетчиком и эталонной установкой;

σ_δ — среднеквадратическая погрешность;

t_α — квантиль распределения Стьюдента.

Основная погрешность счетчика

$$\delta = \delta_c \pm \tilde{\delta}.$$

Во всех рассмотренных случаях поверки расходомеров и счетчиков определяется погрешность и сравнивается с допускаемыми значениями. Если полученные значения погрешности превышают допускаемые, производится регулировка или новая градуировка, т.е. опре-

деление новой номинальной статической характеристики преобразования. Если и после этого погрешность превышает допускаемую, устройство окончательно бракуется.

При эксплуатации **высокоточных турбинных преобразователей** расхода счетчиков нефти и нефтепродуктов, имеющих допускаемую погрешность 0,15 и 0,25 %, для обеспечения требуемой точности при поверке практически всегда необходимо производить корректировку градуировочной характеристики. Кроме того, трудно обеспечить соотношение погрешностей эталонного средства и поверяемого счетчика 1:3. Поэтому по результатам поверки погрешность счетчика рассчитывается с учетом погрешности эталонного средства.

Для определения номинальной статической характеристики преобразования (зависимости коэффициента преобразования от расхода) находят значения коэффициента преобразования в крайних точках диапазона измерения и нескольких промежуточных. Количество точек и расстояние между ними определяются в зависимости от крутизны характеристики. Там, где крутизна характеристики больше, там больше выбирается точек и меньше интервал между ними.

При каждом значении расхода проводится не менее пяти измерений. Для каждого расхода рассчитывается среднеквадратическая погрешность σ

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (K_i - \bar{K})^2}{n-1} \cdot \frac{100}{\bar{K}}},$$

где K_i — коэффициент преобразования, полученный при i -м измерении; $\bar{K}$ — среднее арифметическое значение коэффициента преобразования, полученное при данном расходе,

$$\bar{K} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n K_i;$$

n — число измерений при данном расходе.

Полученное значение среднеквадратической погрешности не должно превышать допускаемого для конкретного типа преобразователя.

Затем вычисляется значение систематической составляющей погрешности δ_c . Она складывается из неисключенной систематической составляющей погрешности эталонной установки, погрешностей, вызванных неисключенными систематическими погрешностями других измерительных устройств, примененных при поверке, а также погрешности аппроксимации полученных результатов.

Рассчитывается основная погрешность преобразователя δ

$$\delta = \delta_c \pm t_{\alpha} \sigma.$$

Если в процессе эксплуатации вязкость измеряемой среды может изменяться, после определения номинальной статической характеристики и основной погрешности преобразователя определяется функция влияния вязкости.

4.3. Беспроволочная поверка

Если по известным параметрам расходоизмерительного устройства и параметрам течения измеряемой среды может быть определено значение выходного сигнала, известны источники возникновения погрешности и их вклад в суммарную погрешность измерения, поверка может быть проведена беспроволочным методом без использования эталонных расходомерных установок.

В настоящее время методики беспроволочной поверки разработаны для расходомеров переменного перепада давления со стандартными и специальными сужающими устройствами, ультразвуковых, электромагнитных, вихревых, корреляционных расходомеров и счетчиков. Во всех этих расходоизмерительных устройствах преобразователи расхода не имеют подвижных элементов в гидравлическом канале.

Погрешность расходоизмерительного устройства определяется косвенным методом как сумма погрешностей отдельных элементов устройства (поэлементная поверка) или путем имитации течения среды через преобразователь расхода с помощью специальных средств (имитационная поверка). По существу, имитационная поверка может считаться своеобразной разновидностью поэлементной.

Источниками погрешности измерения расхода и количества в общем случае являются:

- погрешность геометрических параметров преобразователя расхода;
- погрешность определения параметров измеряемой среды и режима течения;
- погрешность промежуточных измерительных преобразователей и показывающих приборов.

Операции беспроволочной поверки:

- внешний осмотр;
- опробование;
- определение погрешности.

погрешность установки: при поверке преобразователей расхода, расходомеров, счетчиков расходомеров и теплосчетчиков по объемному расходу и объему $\pm 0,2\%$; при поверке теплосчетчиков по тепловой энергии $\pm 0,5\%$.

Установка позволяет проводить комплектную и полэлементную поверку в автоматизированном и полуавтоматизированном режимах. В полуавтоматизированном режиме помимо операций поверки, предусмотренных методикой поверки, можно проводить также дополнительные исследования характеристик прибора.

Поверка проводится в соответствии с МИ 2299-2001 «Рекомендация. ГСИ. Электромагнитные теплосчетчики, расходомеры и счетчики-расходомеры. Методика поверки». При поверке счетчика-расходомера проводятся следующие операции:

- внешний осмотр;
- проверка цепи электродов;
- проверка изоляции электродов;
- проверка сопротивления изоляции цепей питания;
- измерение внутреннего диаметра трубы преобразователя расхода и расстояния между электродами (у непроходных приборов);
- измерение характерных геометрических размеров преобразователя скорости и измерение площади проходного сечения канала трубопровода (у приборов с электромагнитными преобразователями скорости);
- опробование;
- определение погрешности в режиме измерения расхода и объема.

При поверке непроходного расходомера с помощью нутромера измеряется диаметр трубопровода в трех поперечных сечениях — в плоскости электродов и на расстоянии 0,25 диаметра в обе стороны от плоскости электродов. В каждом сечении проводят измерения в восьми равноотстоящих точках (исключая контактные поверхности электродов), примерно через $22,5^\circ$. Отдельно измеряют расстояние между контактными поверхностями электродов.

Результаты измерений заносят в компьютер. Программа поверки определяет среднее значение диаметра и среднее квадратическое отклонение результатов измерений диаметра. В компьютер заносят паспортные данные поверяемого прибора.

Для опробования и определения погрешности при комплектной поверке непроходного электромагнитного расходомера собирают схему, приведенную на рисунке 45. Опробование проводят при имитации расхода, соответствующего 80 % диапазона измерений. Вводят

внутри канала преобразователя расхода преобразователь магнитного поля. Проверяют наличие сигнала преобразователя магнитного поля и тока питания индуктора.

При определении основной погрешности проверяют установку нуля при заполнении канала преобразователя водой, измеряют смещение нуля прибора, имитируют поток жидкости с расходом, указанным в технической документации поверяемого прибора, измеряют выходной сигнал в поверяемых точках диапазона измерения и рассчитывают основную погрешность.

Относительная погрешность δ определяется по формуле

$$\delta = \frac{A_{\phi} - A_p}{A_p - A_0} \cdot 100,$$

приведенная погрешность γ — по формуле

$$\gamma = \frac{A_{\phi} - A_p}{A_{\max} - A_0},$$

где A_{ϕ} — фактическое значение выходного сигнала;

A_p — расчетное значение выходного сигнала;

A_0 — начальное значение выходного сигнала;

$A_{\max}$ — максимальное значение выходного сигнала.

При поверке приборов с погружными электромагнитными преобразователями скорости измеряются их характерные геометрические размеры. Для определения погрешности измерения скорости собирается схема, аналогичная схеме поверки непроходных приборов. При этом преобразователь магнитного поля соответствующей конструкции размещается на преобразователе скорости. Схемы могут отличаться только количеством преобразователей скорости. Для приборов с несколькими преобразователями скорости определяют поправочный коэффициент, учитывающий разброс характеристик магнитного поля преобразователей скорости. Погрешность измерения скорости определяется по формулам, приведенным выше.

Основную погрешность по объемному расходу приборов с погружными преобразователями скорости δ_q рассчитывают при условии, что имеется возможность измерить геометрические параметры трубы, на которой устанавливается прибор.

Относительная погрешность

$$\delta_q = 1,1 \sqrt{\delta^2 + \delta_S^2 + \delta_a^2},$$

приведенная погрешность

$$\gamma_q = 1,1 \sqrt{\gamma^2 + \delta_S^2 + \delta_\alpha^2},$$

где δ и γ — относительная или приведенная погрешность измерения скорости;

δ_S — погрешность определения площади поперечного сечения канала;
 δ_α — погрешность коэффициента α_v , связывающего среднюю скорость в сечении с местной скоростью, измеряемой преобразователем.

Погрешность определения площади сечения канала зависит от метода измерений, погрешностей средств измерений и состояния трубопровода. Поэтому значение δ_S определяют для каждого конкретного случая.

Для осесимметричного потока в цилиндрическом канале значение $\delta_\alpha = 1,0\%$. Значение α_v заложено в программе.

Беспробивная поверка частотно-импульсного ультразвукового расходомера со счетчиком

Структурная схема частотно-импульсного расходомера со счетчиком приведена на рисунке 46.

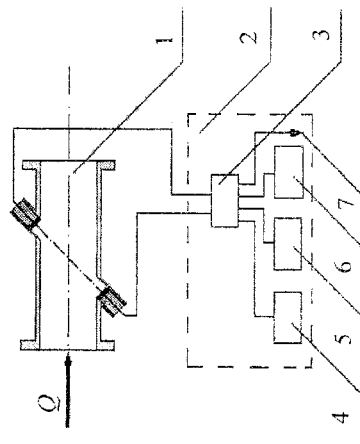


Рис. 46. Структурная схема ультразвукового расходомера со счетчиком:

- 1 — преобразователь расхода; 2 — измерительный прибор;
- 3 — преобразователь «скорость — частота»;
- 4 — преобразователь «частота — аналог»;
- 5 — устройство индикации расхода;
- 6 — устройство индикации количества; 7 — частотный выход со счетчиком.

Коэффициент преобразования K , связывающий частотный выходной сигнал с расходом, выражается формулой

$$K = \frac{f}{Q_0} = \frac{4}{\pi D^2} \frac{2 \cos \alpha}{L \left(1 + \frac{tc}{L}\right)^2} Br,$$

где f — выходной сигнал преобразователя «скорость — частота»;
 Q_0 — объемный расход;

D — внутренний диаметр преобразователя расхода;

α — угол наклона оси акустического канала;

L — длина акустического канала;

t — время задержки сигнала в электронно-акустическом тракте, не связанное со временем прохождения сигнала в измеряемой среде;
 c — скорость звука в измеряемой среде;

Br — гидродинамический коэффициент, связывающий среднюю скорость измеряемой среды по оси акустического канала и среднюю скорость потока по сечению преобразователя расхода.

Таким образом, погрешность преобразования расхода в частотный сигнал складывается из погрешности геометрических параметров (внутреннего диаметра преобразователя, длины акустического канала, угла наклона его оси и смещения его оси относительно оси преобразователя расхода), погрешности определения времени задержки сигнала и скорости звука.

При поверке проводятся следующие операции:

- внешний осмотр;
- опробование;
- проверка смещения нуля;
- определение погрешности.

При определении погрешности измеряются геометрические параметры преобразователя расхода:

- внутренний диаметр;
- длина акустической оси (расстояние между торцами пьезоэлектрических преобразователей);
- угол наклона акустической оси;
- смещение акустической оси относительно оси преобразователя расхода.

Измеряются параметры преобразователя «скорость — частота»: периоды автоциркуляции импульсов по электронно-акустическому контуру при разном направлении акустических колебаний в неподвижной жидкости.

По таблицам определяются значения вязкости и скорости звука в измеряемой среде.

Определяется погрешность преобразователя «частота — аналог» и устройств индикации расхода и объема. Погрешность определяется путем подачи от генератора импульсов на вход этих устройств частотного сигнала, имитирующего выходной сигнал преобразователя «скорость — частота» при нескольких значениях расхода, охватывающих диапазон измерения.

По результатам измерения рассчитываются:

- средние арифметические значения измеренных параметров;
- средние квадратические отклонения результатов измерения;
- погрешность измерения, которая складывается из неисключенной систематической составляющей (инструментальной погрешности средства измерения) и случайной составляющей, определяемой с заданной доверительной вероятностью;
- время задержки сигнала в электронно-акустическом контуре, не связанное с потоком жидкости, при разном направлении акустических колебаний, а также разность этого времени;
- средние значения вязкости и скорости звука в рабочем диапазоне температур и их погрешности за счет осреднения;
- значения гидродинамического коэффициента, связывающего среднюю скорость жидкости по сечению канала со средней скоростью по акустической оси, при разных расходах в пределах диапазона измерения;
- среднее значение и погрешность гидродинамического коэффициента, которая складывается из погрешности собственно определения значения коэффициента и погрешности за счет осреднения его значения в диапазоне измерения расхода;
- значения коэффициента преобразования «расход — частота»

$$K = \frac{f}{Q};$$

— относительная погрешность коэффициента преобразования

$$\delta_K = \frac{\Delta_K}{K},$$

$$\Delta_K = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial K}{\partial x_i} \Delta x_i^2 \right)};$$

где

Δ_K — абсолютная погрешность коэффициента преобразования;

Δx_i — погрешность определения i -го параметра;

$\frac{\partial K}{\partial x_i}$ — функция влияния i -го параметра.

Затем рассчитываются погрешности измерения расхода, объема и погрешность аналогового выходного сигнала, которые складываются из погрешности преобразования «расход — частота» и погрешностей устройств индикации расхода, объема, преобразователя «частота — аналог» соответственно.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бирюков Б.В., Данилов М.А., Кивилис С.С. Испытания расходомеров. — М.: Изд-во стандартов, 1987.
2. Кремлевский П.П. Измерение расхода и количества жидкости, газа и пара. — М.: Изд-во стандартов, 1980.
3. Кремлевский П.П. Расходомеры и счетчики количества. — Л.: Машиностроение, 1989.
4. Кремлевский П.П. Расходомеры и счетчики количества веществ. — СПб.: Политехника, 2002.
5. Пугачев Н.С. Метрологическое обеспечение расходоизмерительной техники. — М.: Изд-во стандартов, 1988.
6. Цейтлин В.Г. Техника измерения расхода жидкостей, газов и паров. — М.: Изд-во стандартов, 1981.
7. Шорников Е.А. Расходомеры и счетчики газа, узлы учета. — СПб.: Политехника, 2003.
8. ГОСТ 6019–83. Счетчики холодной воды крыльчатые. Общие технические условия.
9. ГОСТ 13045–81. Ротаметры. Общие технические условия.
10. ГОСТ 14167–83. Счетчики холодной воды турбинные. Технические условия.
11. ГОСТ 15528–86. Средства измерения расхода, объема или массы протекающих жидкости или газа. Термины и определения.
12. ГОСТ 28066–89. Счетчики жидкости камерные. Общие технические условия.
13. ГОСТ 28723–90Е. Расходомеры скоростные, электромагнитные и вихревые. Общие технические условия и методы испытаний.
14. ГОСТ 28724–90Е. Счетчики газа скоростные. Общие технические условия и методы испытаний.
15. ГОСТ Р 50193.1–92. Измерение расхода воды в закрытых каналах. Счетчики питьевой воды. Технические требования.
16. ГОСТ Р 50193.2–92. Измерение расхода воды в закрытых каналах. Счетчики питьевой воды. Требования к установке.
17. ГОСТ Р 50193.3–92. Измерение расхода воды в закрытых каналах. Счетчики питьевой воды. Методы испытаний.
18. ГОСТ Р 50601–93. Счетчики питьевой воды крыльчатые. Общие технические условия.
19. ГОСТ 8.009–84. ГСИ. Нормируемые метрологические характеристики средств измерений.

20. ГОСТ 8.407–75. ГСИ. Расходомеры несжимаемых жидкостей. Нормируемые метрологические характеристики.
21. ГОСТ 8.142–75. ГСИ. Государственный первичный эталон и общесоюзная поверочная схема для средств измерений массового расхода жидкости в диапазоне $1 \cdot 10^{-3} \div 2 \cdot 10^3$ кг/с.
22. ГОСТ 8.143–75. ГСИ. Государственный первичный эталон и общесоюзная поверочная схема для средств измерений объемного расхода газа в диапазоне $1 \cdot 10^{-6} \div 1 \cdot 10^2$ м³/с.
23. ГОСТ 8.145–75. ГСИ. Государственный первичный эталон и общесоюзная поверочная схема для средств измерений объемного расхода жидкости в диапазоне $3 \cdot 10^{-6} \div 10$ м³/с.
24. ГОСТ 8.369–79. ГСИ. Государственный первичный эталон и общесоюзная поверочная схема для средств измерений массового расхода газа в диапазоне $4 \cdot 10^{-2} \div 2,5 \cdot 10^2$ кг/с.
25. ГОСТ 8.373–80. ГСИ. Государственный специальный эталон и общесоюзная поверочная схема для средств измерений объемного расхода нефтепродуктов в диапазоне $2,8 \cdot 10^{-6} \div 2,8 \cdot 10^{-2}$ м³/с.
26. ГОСТ 8.374–80. ГСИ. Государственный специальный эталон и общесоюзная поверочная схема объемного расхода воды в диапазоне $2,8 \cdot 10^{-8} \div 2,8 \cdot 10^{-2}$ м³/с.
27. ГОСТ 8.510–84. ГСИ. Государственная поверочная схема для средств измерений (счетчиков) объема жидкости.
28. ГОСТ 8.122–99. ГСИ. Ротаметры. Методика поверки.
29. ГОСТ 8.156–83. ГСИ. Счетчики холодной воды. Методы и средства поверки.
30. ГОСТ 8.252–77. ГСИ. Расходомеры тахометрические шариковые. Методы и средства поверки.
31. ГОСТ 8.320–78. ГСИ. Расходомеры электромагнитные. Методы и средства поверки.
32. ГОСТ 8.324–2002. ГСИ. Счетчики газа. Методы и средства поверки.
33. ГОСТ 8.361–79. ГСИ. Расход жидкости и газа. Методика выполнения измерений по скорости в одной точке сечения трубы.
34. ГОСТ 8.451–81. ГСИ. Счетчики жидкости камерные. Методы и средства поверки.
35. МИ 163–78. Методика поверки массовых расходомеров жидкости.
36. МИ 249–83. Электромагнитные расходомеры ИР-51, 4-РИМ, 5-РИМ. Методы и средства беспробивной поверки.

37. МИ 1592-96. ГСИ. Счетчики воды. Методика поверки.
 38. МИ 1974-95. ГСИ. Преобразователи расхода турбинные. Методика поверки.
 39. МИ 2157-91. ГСИ. Счетчик воды ультразвуковой «Расход-7». Методика поверки беспроливным способом.
 40. МИ 2299-2001. ГСИ. Электромагнитные теплосчетчики, расходомеры и счетчики-расходомеры. Методика поверки.
 41. Приборы и средства автоматизации. Отраслевой каталог. 1.3. Приборы для измерения и регулирования расхода и количества жидкостей и газов.
 42. Техническая документация ГНЦ «НИИтеплоприбор».
 43. Техническая документация ЗАО «Тепловодомер».
 44. Техническая документация ЗАО «ИВК Саяны».
 45. Техническая документация фирмы «EMERSON Process Management».
 46. Техническая документация фирмы «YOKOGAWA Electric Corporation».
 47. Техническая документация фирмы «Krohne».
 48. Техническая документация фирмы «Bronkhorst High-Tech B. V.».

ОГЛАВЛЕНИЕ

1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ	3
1.1. Основные термины и определения	3
1.2. Требования к расходоизмерительным устройствам	5
1.3. Классификация расходомеров	9
1.4. Нормируемые метрологические характеристики расходомеров	12
2. ОСНОВНЫЕ ТИПЫ РАСХОДОИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ	16
2.1. Камерные счетчики жидкости	16
2.2. Мембранные счетчики газа	17
2.3. Ротационные счетчики газа	18
2.4. Турбинные расходомеры и счетчики	19
2.5. Шариковые расходомеры	27
2.6. Ротаметры	28
2.7. Электромагнитные расходомеры	31
2.8. Ультразвуковые расходомеры	36
2.9. Корреляционные расходомеры	42
2.10. Вихревые расходомеры	44
2.11. Струйные расходомеры	46
2.12. Кориолисовые расходомеры	48
2.13. Тепловые расходомеры	50
3. РАСХОДОМЕРНЫЕ УСТАНОВКИ ДЛЯ ПОВЕРКИ И КАЛИБРОВКИ РАСХОДОИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ	54
3.1. Состав расходомерных установок	54
3.2. Жидкостные расходомерные установки	56
3.3. Газовые расходомерные установки	68
4. ПОВЕРКА И КАЛИБРОВКА РАСХОДОИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ	76
4.1. Поверочные схемы	76
4.2. Поверка проливным методом	78
4.3. Беспроливная поверка	87
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	96