

Промышленные счетчики воды. Обзор.

Вячеслав РОМАДОВ,

Технический директор

ООО «Теплоком-Сервис»,

к. т. н.

Введение

Повсеместное нерациональное использование воды, казалось бы, «неиссякаемого» ресурса, привело к неоправданному росту мощностей очистных сооружений и насосных станций для обеспечения растущих потребностей. Свою лепту вносят и потери при транспортировке воды к потребителю из-за изношенности трубопроводов. Результатом этого стал рост нормативов потребления, включающий в себя компенсацию утечек в негерметичных трубопроводах и, как следствие, рост тарифов за потребленную воду, также компенсирующий эти утечки.

Принятие федеральных и региональных законов об энергосбережении диктуется в настоящее время требованиями рационального использования как возобновляемых, так и невозобновляемых ресурсов и источников энергии.

Широкое внедрение приборного контроля распределения и потребления является основным инструментом сбережения такого важного для жизнеобеспечения населенных пунктов и предприятий ресурса как вода.

Общая классификация

Общепринятым на сегодняшний день является разделение счетчиков воды на промышленные и индивидуальные. При этом под индивидуальными понимаются счетчики с условным диаметром прохода Ду15 ($D=15$ мм) и преимущественно ограничивается тахометрическими приборами, а под промышленными понимаются счетчики с диаметрами $D \geq 20$ мм. Однако обзор областей применения промышленных счетчиков воды показывает, что охватывается диапазон диаметров от $D=2$ мм (системы охлаждения и т.п.) до $D=5000 \div 6000$ мм (водоводы крупных городов) и используются все разработанные на сегодняшний день типы счетчиков.

Таким образом, говоря о промышленных счетчиках воды, будем говорить о водосчетчиках вообще, имея в виду, что небольшая часть из них может иметь, в том числе, специальное применение.

Выбор методов и средств измерения расхода промышленными счетчиками воды связан с решением комплекса метрологических, технических и технологических задач, к которым, например, относятся:

1. выбор метода измерения на основе анализа современного состояния метрологии с учетом условий работы первичного преобразователя и его линий связи;
2. выбор конструкции первичного преобразователя для конкретных условий измерения;
3. определение возможного способа монтажа первичного преобразователя;
4. обеспечение возможности периодической поверки расходомерного устройства прямым (на поверочной установке), расчетными методами и возможность поверки на месте эксплуатации;

Немаловажное значение имеет и стоимость счетчика, но эта категория условно значима, так как в некоторых случаях стоит задача обеспечения измерений расхода (количества) любой ценой, особенно в сложных условиях применения, а в отдельных случаях выбора просто нет.

Следует оговориться, что ГОСТ 15528-86 «Средства измерения расхода, объема или массы протекающих жидкости и газа. Термины и определения» выделяет 39 типов преобразователей расхода. Проанализируем получившие на сегодняшний день наибольшее распространение типы средств измерения расхода воды с точки зрения решения перечисленных выше задач.

Типы промышленных счетчиков воды (начало).

1. Электронные счетчики

К классу электронных счетчиков относятся приборы, первичный сигнал которых является электрическим. Следовательно, для обработки этого сигнала необходим первичный электронный блок, который производит усиление этого сигнала, его преобразование и нормирование.

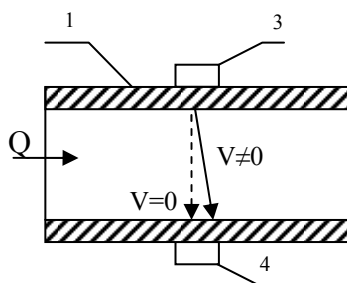
1.1. Акустический метод. Ультразвуковые расходомеры

Основой акустического метода измерения является тот факт, что скорость распространения звуковой волны в движущейся среде определяется геометрической суммой скорости звука (C_0) в данной неподвижной среде и собственно скорости движения самой среды (V_0).

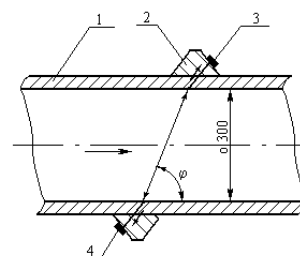
Наиболее часто используют на практике два способа, различающиеся взаимным пространственным расположением направлений вектора скорости жидкости и вектора распространения звуковой волны.

Первый способ основан на определении сноса движущейся средой ультразвукового луча, направленного под прямым углом к вектору движению потока (рис.1.1.а). По сути, измеряется уменьшение количества акустической энергии, попадающей на приемник с ростом скорости потока.

Недостатком данного способа является низкая чувствительность, поэтому чаще применяется разновидность этого способа, заключающаяся в том, что луч направляют под небольшим углом относительно диаметра трубы и принимают после многократного отражения от стенок трубы. Таким образом, добиваются увеличения пути, проходимого лучом. Чувствительность данной конструкции выше, чем у основной разновидности способа, однако следует отметить, что показания существенно зависят от степени коррозии и загрязнений отражающих поверхностей трубы. Кроме того, скорость звука в среде зависит от температуры жидкости, ее кинематической вязкости (ν) и степени загрязнения жидкости. Эта зависимость приводит к возрастанию погрешности при изменении физико-химических свойств измеряемой жидкости.



а) измерение сноса луча



б) измерение изменения скорости ультразвука

Рис.1.1. Ультразвуковой расходомер

1 - трубопровод; 2 - призмы; 3,4 - пьезокерамические преобразователи (узел крепления не показан)

Для исключения влияния зависимости скорости звука от различных факторов расход (количество) жидкости определяют по разности скорости распространения звука в направлении движения потока и против него (рис.1.1.б). Ультразвуковой луч при этом направляют под углом φ к направлению движения потока.

В данном способе различают следующие разновидности.

Время-импульсный метод. Измеряется время прохождения импульса по потоку и против него. В данном методе остается зависимость от скорости ультразвука в среде, но существуют возможности компенсации этой зависимости, например, установкой дополнительной пары резонаторов.

Частотно-импульсный метод. В этом методе каждый пришедший к приемнику импульс (или пачка импульсов) возбуждает генерацию нового импульса. Измеряя частоту повторения импульсов по потоку и против него, вычисляют расход. Преимуществом данного метода является независимость характеристики от скорости звука.

Фазовый метод. В данном методе измеряется разность фаз сигнала по и против потока. Метод основан на том, что при изменении скорости потока сигнал приходит к приемнику с различной фазой. Зависимость от скорости ультразвука в жидкости такая же, как во время-импульсном методе.

Следует отметить, что средняя скорость потока V_{0y} (усредненная по диаметру трубопровода), определяемая ультразвуковым методом;

$$V_{0y} = \frac{\cos \varphi}{2R} \cdot \int_{-R}^{+R} V(r) dr, \quad (1.1)$$

отлична от среднерасходной скорости (усредненной по площади сечения трубопровода);

$$V_0 = \frac{\cos \varphi}{2R^2} \cdot \int_{-R}^{+R} V(r) \cdot r \cdot dr. \quad (1.2)$$

С учетом степенного закона распределения для профиля скорости связь между величинами V_0 и V_{0y} определяется следующим выражением:

$$V_0 = \frac{2n}{2n+1} \cdot V_{0y} \quad (1.3)$$

Поправочный коэффициент n определяется по формуле:

$$n = (1,119 - 0,011 \cdot \lg Re)^{-1}, \quad (1.4)$$

Где $Re = \frac{V_0 \cdot D}{\nu}$ – число Рейнольдса, по сути – безразмерная скорость, параметр,

обобщенно описывающий характер движения потока независимо от диаметра трубопровода.

Существует еще одна разновидность ультразвуковых расходомеров – доплеровские расходомеры. Доплеровский метод основан на возникновении сдвига частот при отражении звукового луча от движущейся частицы или неоднородности потока, например, от газового пузырька. Недостатком метода является требование наличия таких неоднородностей.

Так как в ультразвуковом расходомере при вычислении среднерасходной скорости используют степенной закон распределения профиля скорости, то он должен применяться, строго говоря, только на участках стабилизированного течения. Для успешной эксплуатации ультразвуковых расходомеров необходима их установка на длинных прямолинейных (до $20 D_y$) участках трубопровода. При этом погрешность измерения не превышает $\pm(1 \div 2)\%$. Стендовые исследования, доказывающие возможность работы на коротких участках трубопроводов не гарантируют высокой точности ультразвуковых расходомеров в реальных условиях, так как стабилизация потока на поверочной установке может быть достигнута, например, применением специальных успокоителей потока и струевыпрямителей.

Для реализации ультразвукового метода применяют три основных конструкции первичного преобразователя, а именно:

Моноблочная конструкция. Преобразователь представляет собой отрезок трубы с фланцами. Пьезопреобразователи смонтированы на трубе стационарно. Данный преобразователь калибруется на поверочной установке и поставляется полностью готовым к использованию.

Конструкция с врезными пьезопреобразователями. В данной конструкции пьезопреобразователи монтируются стационарно на существующем трубопроводе.

Конструкция с накладными пьезопреобразователями. Пьезопреобразователи монтируются на существующем трубопроводе с помощью специальных прижимных устройств.

Из перечисленных конструкций наименьшие погрешности измерения расхода у моноблочного преобразователя.

Наихудшие показатели погрешностей у конструкции с накладными пьезопреобразователями. Опыт автора и анализ литературы показывает, что такие преобразователи можно использовать в качестве индикаторов. Для целей коммерческого учета и для технологических измерений их можно использовать с большой долей скептицизма и только при тщательном и точном измерении геометрических параметров, а также при скрупулезной установке пьезопреобразователей, что требует привлечения высококвалифицированных специалистов-монтажников.

К достоинствам последних двух конструкций можно отнести возможность измерения расхода в трубах больших диаметров (более 1000 мм).

1.2. Электромагнитные расходомеры

Принцип действия электромагнитного расходомера (ЭМР) основан на законах Фарадея и подчиняется правилу Ленца, то есть, проводник, движущийся в магнитном поле, порождает э.д.с., пропорциональную скорости движения проводника. В случае электромагнитного расходомера проводник – это жидкость, текущая в немагнитной трубе (рис.1.2)

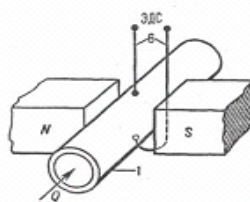


Рис.1.2. Принципиальная схема электромагнитного расходомера

Работа электромагнитного расходомера описывается 1-м и 2-м уравнениями Максвелла. Решение этих уравнений, данное Дж. Шерклифом применительно к ЭМР имеет вид:

$$\nabla^2 U = \bar{V} \cdot \text{rot} \bar{V} - \bar{V} \text{rot} \bar{V}, \quad (1.6)$$

где U - потенциал, В;
 V - скорость потока, м/с;
 B - магнитная индукция, Тл.

Для уменьшения влияния возможных неосесимметричных возмущений потока на погрешность измерения, расходомеры устанавливают на расстояние не менее 3÷5 диаметров трубопровода от источников возмущения потока.

При градуировке на поверочной установке достигается погрешность измерения расхода $\pm(0,15 \div 2,0) \%$ в зависимости от динамического диапазона.

Случайная погрешность измерения расхода составляет, как правило, $\pm(0,1 \div 0,15) \%$.

Величину индуцированного сигнала ЭМР можно получить расчетным путем по следующему соотношению:

$$E = k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot k_4 \cdot B \cdot V \cdot D, \quad (1.7)$$

где коэффициенты $k_1 \div k_4$ учитывают:

$k_1 = f_1(\sigma_{\text{тр}}, \sigma_{\text{ж}})$ - влияние электропроводности материала трубопровода и жидкости;

$k_2 = f_2(T)$ - влияние температуры жидкости;

$k_3 = f_3(L_m/D)$ - неоднородность магнитного поля в зазоре преобразователей;

$k_4 = f_4(Re_m)$ - искажение приложенного магнитного поля индуцированными токами.

В литературе приводится различная точность расчета характеристик расходомеров и составляет обычно $\pm (4 \div 5) \%$. По-видимому, основной причиной, приводящей к погрешности, является сложность учета всех факторов, связанных с их пространственным распределением и температурной зависимостью индукции магнитного поля преобразователей. В последнее время появляются статьи, декларирующие получение расчетными методами погрешности измерения $\pm (0,3 \div 0,5) \%$, при этом приводится 3-4 примера, что не является презентабельной статистикой.

Часто для упрощения расчета конструируют магнитную систему с довольно длинными полюсными наконечниками ($L_m / D \geq 3$), что приводит к возрастанию ее веса и габаритов.

Достоинствами ЭМР являются:

- простота конструкции преобразователя;
- электрический сигнал на выходе преобразователя;
- практическая безынерционность;
- малое гидравлическое сопротивление.

В трубопроводах большого диаметра заметно проявляется следующие недостатки ЭМР:

- большие габариты и масса системы возбуждения магнитного поля;
- сложность предварительного расчета градуировочной зависимости с погрешностью менее $\pm (3 \div 5) \%$;
- практическая невозможность демонтажа преобразователя из контура для поверки на образцовом стенде.

Последние два недостатка являются несущественными, если имеются средства градуировки и периодической поверки расходомеров по месту эксплуатации.

Для создания магнитного поля ЭМР используют как постоянные магниты, так и электромагниты. Основное достоинство электромагнитов в сравнении с постоянными магнитами - меньший вес и стоимость. Недостаток - необходимость источника питания.

Разработано множество конструкций ЭМР с седловидными катушками. Расхождение расчетного значения величины магнитного поля с экспериментально измеренным не превышало 2 %.

Применение постоянных магнитов позволяет создавать простые, надежные в эксплуатации приборы, не требующие электрического питания для создания магнитного поля. К недостаткам ЭМР с постоянными магнитами относится большой вес магнитной системы и дрейф чувствительности из-за старения, температурных циклов, ударов. При уменьшении размеров полюсных наконечников, и, следовательно, веса магнитной системы увеличивается нелинейность градуировочной характеристики, что, впрочем, не имеет решающего значения при индивидуальной градуировке преобразователей расхода.

Еще один недостаток ЭМР с постоянными магнитами – поляризация электродов и снижение чувствительности. Поэтому наибольшее практическое применение находят ЭМР с переменным магнитным полем.

Для измерения в трубах больших диаметров используют зондовые электромагнитные расходомеры, представляющие собой тело обтекания, в котором смонтированы электроды и система возбуждения магнитного поля. При одном зонде

измеряется локальная скорость потока в точке $0,777Ro$, в которой скорость равна средней по сечению трубы. При трех зонда скорость измеряется по методу «площадь-скорость-градиент» и достигаются меньшие показатели погрешности расходомера. Погрешность зондовых преобразователей обычно находится в пределах $\pm(1,5\div 4,0)\%$.

1.3. Статистические расходомеры

Одной из перспективных конструкций статистического самоградуируемого расходомера является корреляционный расходомер.

Этот расходомер представляет собой разновидность меточных расходомеров, в которых о величине расхода Q судят по скорости движения метки при прохождении расстояния L между двумя преобразователями:

$$Q = k \cdot \frac{L}{\tau_T} \cdot S. \quad (1.8)$$

где S - площадь поперечного сечения потока, m^2 ;

τ_T - время транспорта метки между преобразователями, с;

k - поправочный коэффициент.

В качестве преобразователей могут использоваться ультразвуковые, электромагнитные, оптические детекторы, а также термоанемометры.

Общим для меточных расходомеров является то, что метка имеет ограниченный срок жизни и разрушается при движении по потоку. В качестве таких меток могут использоваться неоднородности полей скорости (вихри), давления, температуры и других параметров.

Принципиальная схема корреляционного расходомера показана на рис.1.3.

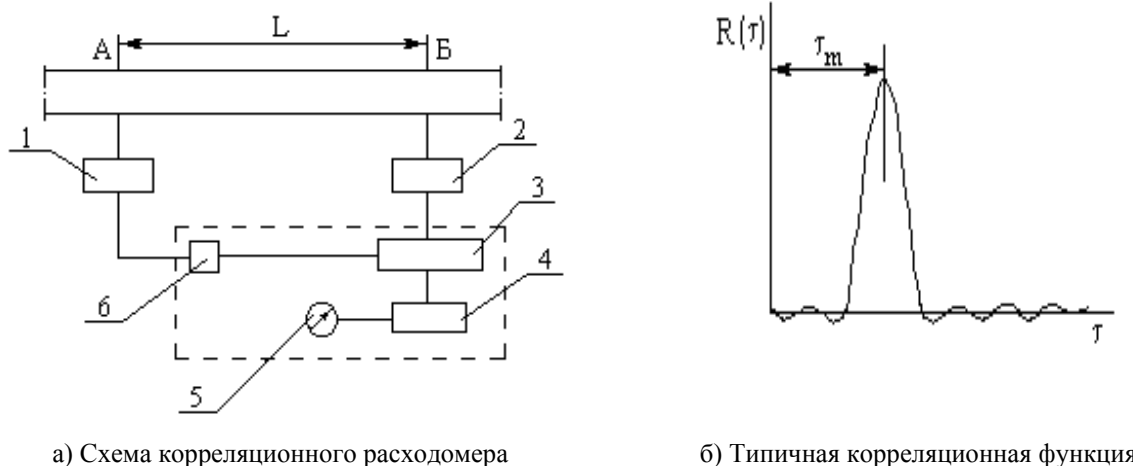


Рис.1.3.Корреляционный расходомер: 1,2 - преобразователи; 3,4,6 - блоки коррелометра; 5 - измерительный прибор.

При прохождении через преобразователи 1 и 2 метки генерируют флуктуационные сигналы. Для определения связи между такими сигналами применяют статистический, в частности, корреляционный анализ, когда транспортное время определяют по сдвигу максимума корреляционной функции $R(\tau)$, определяемой соотношением:

$$R(\tau) = \frac{1}{t_u} \cdot \int_0^{t_u} f_1(t) \cdot f_2(t - \tau) \cdot dt, \quad (1.9)$$

где $f_1(t)$, $f_2(t)$ - сигналы первого и второго преобразователей соответственно;
 t - ордината исходного сигнала на временной оси;
 τ - время задержки, ордината корреляционной функции.

Преимуществом корреляционного метода является возможность самопроверки на месте эксплуатации, а также то, что он является «абсолютным» прибором, так как измеряет скорость движения гидродинамической метки, являющейся частью потока. Скорость движения метки прямопропорционально связана со средней скоростью потока.

Недостатки:

- Требование длинных прямолинейных участков;
- Большое время одного цикла измерений;
- Относительно высокие значения погрешности измерения расхода (в лучшем случае $\pm 1,5\%$).

Корреляционными расходомерами можно также измерять расход в трубах больших диаметров.

В качестве примера статистических расходомеров можно привести перспективные расходомеры, работающие по методу «частот Райса» и по методу «нулевого счета», но к настоящему времени они не вышли из стадии научно-исследовательских разработок.

1.4. Вихревые расходомеры

Вихревые расходомеры, принцип действия которых основан на зависимости от расхода частоты колебаний давления (направления движения части потока), возникающих в потоке в процессе вихреобразования или прецессии закрученной струи, вытекающей в расширенную часть трубы, являются сравнительно новым, но достаточно перспективным средством измерения.

Основные достоинства этих расходомеров:

- отсутствие подвижных элементов в потоке и, как следствие, высокая надежность и долговечность;
- линейность выходной характеристики;
- частотный выходной сигнал;
- незначительное влияние на погрешность изменения температуры, давления, вязкости, возможность применения для большинства жидкостей;
- большой диапазон измеряемых расходов (до 100:1);
- возможность использования в тяжелых эксплуатационных условиях (высокое давление и температура среды);
- высокая точность и воспроизводимость показаний.

Принцип работы расходомеров с прецессией струи состоит в следующем. Жидкость или газ закручивается специальным устройством таким образом, чтобы на оси вращающегося потока возникала струя, осевое движение в которой отличается от основного. Весь вращающийся поток проходит через сужение, в котором увеличивает свою скорость, а затем расширяется. Это расширение вызывает увеличение давления на оси датчика, вследствие чего струя начинает прецессировать (колебаться), причем, так как она отличается от основного потока скоростью, давлением, температурой, плотностью, то, проходя мимо чувствительного элемента, создает в нем периодические колебания выходного сигнала.

Частота прецессии струи f связана со скоростью потока v через закручивающий аппарат соотношением:

$$f = v / 2\pi \omega J_\epsilon \sin\varphi \quad (1.10)$$

где

ω - угловая скорость вращения вихря;

J_ϵ - момент инерции ядра вихря;

φ - угол отклонения оси ядра вихря от оси выходного патрубка.

Принцип работы расходомеров с телом, расположенным в потоке, основан на фиксации колебаний потока, возникающих при обтекании тела. В потоке жидкости, обтекающем тело, расположенное поперек трубопровода, возникают вихревые формирования, периодически отрывающиеся с образующих цилиндра, наиболее удаленных от оси потока. Такие вихри получили название “дорожки Кармана” (рис.1.4).

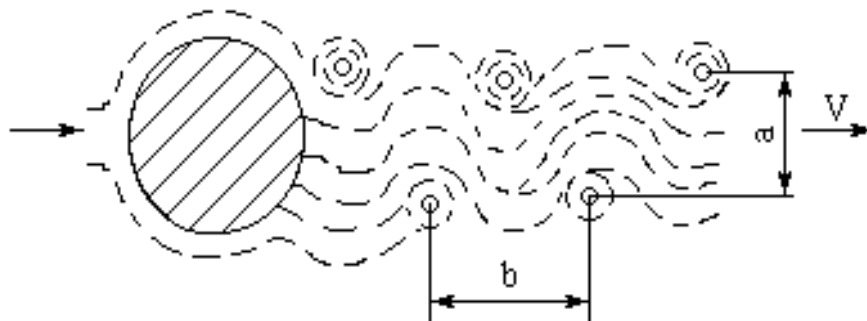


Рис.1.4. Схема образования вихрей

Зависимость между расходом и частотой схода вихрей дается выражением:

$$Q_0 = (s \cdot d / Sh) \cdot f, \quad (1.11)$$

где

s - площадь наименьшего сечения потока вокруг тела обтекания;

d - характерный размер тела обтекания;

Sh - критерий Струхалия, характеризующий безразмерную частоту процесса.

В качестве тел обтекания наибольшее распространение получили цилиндры, трех- и четырехгранные призмы. Погрешность измерения расхода во всем нормированном диапазоне составляет $\pm 1,0\%$.

Частота схода вихрей фиксируется в основном следующими типами детекторов:

- ультразвуковым;
- электромагнитным;
- пьезокристаллическим;
- оптическим.

Некоторые ограничения по использованию вихревых расходомеров связаны с тем, что при малых числах Рейнольдса вихреобразование не возникает. При больших скоростях потока возникают ограничения, связанные с потерями из-за лобового сопротивления, явлениями кавитации в жидкостях.

Недостатки вихревых расходомеров:

- относительно высокое гидравлическое сопротивление;
- невозможность измерения низких расходов из-за слабого вихреобразования (выходной сигнал ниже 1 мкВ).