

# Бесконтактные методы измерения расхода жидкости в напорных и безнапорных трубопроводах

**Г.В. Громов**

*Фирма "СИГНУР", Москва*

**А.В. Озеров**

*СМНУ МГП "Мосводоканал", Москва*

**М.Н. Шафрановский**, кандидат технических наук

*Фирма "СИГНУР", Москва*

**С**оздание и развитие новых технологий и производственных процессов, увеличение стоимости воды и энергетических ресурсов, усиление мер, направленных на защиту окружающей среды, привели к возросшей потребности измерения расхода воды и других жидкостей, протекающих в напорных и безнапорных трубопроводах. Измерение расхода по частоте применения занимает в настоящее время второе место после измерений температуры, что составляет ориентировочно 25% всех промышленных измерений.

В настоящее время наиболее перспективными являются методы измерения с использованием акустических волн. Это обусловлено тем, что акустические колебания и волны являются универсальными носителями информации о состоянии различных объектов. Безопасность и простота излучения-приема акустических, в основном ультразвуковых (УЗ), волн в сочетании со способностью распространяться практически в любых средах позволяют применять УЗ-методы для измерения расстояния, расхода, давления, плотности и других параметров контролируемых сред. Однако основным достоинством УЗ-методов является возможность бесконтактного измерения расстояния и расхода.

## Измерения расхода жидкости в напорных трубопроводах

По сложившейся традиции, для измерения расхода жидкостей в напорных трубопроводах наиболее часто применяются врезные ультразвуковые расходомеры, поскольку их принято считать более точными по сравнению с расходомерами, которые устанавливаются на внешней поверхности трубопровода (с накладными УЗ-преобразователями). Однако в последние десять лет были созданы достаточно надежные и точные (с погрешностью измерения ~2–5%) расходомеры с накладными УЗ-преобразователями, и сейчас они находят все более широкое применение. Это обусловлено тем, что расходомеры с накладными датчиками не требуют врезки в трубопровод, останковки технологических процессов, перекрытия вентилей и т. п., что особо ценно при экспресс-измерениях. Кроме того, не возникает падение давления в трубопроводе, нет влияния прибора на поток, отсутствует возможная коррозия УЗ-преобразователей. Эти приборы отличает простота установки, переноса и замены УЗ-датчиков. Накладные УЗ-преобразователи имеют специальную систему крепления, в которую входят цепи или магниты, и могут монтироваться на действующих трубопроводах в течение 10–20 минут.

Применение расходомеров с накладными УЗ-преобразователями обеспечивает значительную экономию затрат, так как стоимость

установки врезных расходомеров может быть сравнима со стоимостью самих расходомеров, а для трубопроводов больших диаметров – и превосходить ее. Кроме того, расходомеры с накладными УЗ-преобразователями позволяют проводить измерение расхода жидкости, протекающей в чугунных, пластмассовых, стеклянных трубопроводах, где применение врезных расходомеров существенно затруднено.

Принцип действия существующих в настоящее время расходомеров с накладными УЗ-преобразователями базируется на трех различных методах измерения скорости потока:

- корреляционном,
- с использованием эффекта Доплера,
- время-импульсном.

● **Корреляционный метод**

Корреляционный метод основан на измерении скорости движения неоднородностей потока: турбулентных вихрей, а также газообразных и твердых включений путем выделения среднего временного интервала, необходимого для преодоления этими неоднородностями расстояния между двумя парами “излучатель-приемник ультразвука”, расположенными на известном расстоянии друг от друга. Причем УЗ-колебания распространяются перпендикулярно оси потока. По разным причинам этот метод не получил широкого применения.

● **Метод, основанный на использовании эффекта Доплера**

Второй метод основан на известном в физике эффекте Доплера – изменении частоты сигнала, отраженного от движущегося объекта.

Сигнал известной частоты (обычно 0,5–2 МГц) распространяется в жидкой среде, отражается от движущихся в потоке твердых частиц, пузырьков воздуха, локальных различий в плотностях и температурах среды. Чем больше инородных включений в жидкой среде, тем уже полоса частот информативного отраженного и принимаемого сигнала, что обеспечивает более высокую точность измерения скорости движения инородных включений, причем скорость движения инородных включений может отличаться от скорости движения самой жидкой среды примерно на 1–1,5%.

Частота отраженного УЗ-сигнала сравнивается с частотой исходного сигнала (частотой излучателя) и вычисляется разница этих частот, которая в дальнейшем используется для определения скорости потока и расхода жидкости.

Доплеровские УЗ-расходомеры применяются главным образом для измерения расхода многофазных потоков: пульп, суспензий и эмульсий. Типичный представитель таких приборов – расходомер DDF 3078 PEEK MEASUREMENT (США).

● **Время-импульсный метод**

Третий метод основан на разности скоростей распространения УЗ-колебаний вдоль направления движения потока жидкости и навстречу ему. УЗ-колебания, проходящие сквозь среду в направлении движения потока, достигают приемника быстрее, чем УЗ-колебания, проходящие сквозь среду навстречу движению потока. Измеряя разницу скоростей распространения УЗ-колебаний вдоль направления движения потока и навстречу потоку жидкости, можно определить скорость движения жидкой среды и вычислить ее расход.

Данный метод получил в последние годы наиболее широкое применение. Это обусловле-



Рис. 1  
Расходомер АКРОН-01, реализующий время-импульсный метод измерений расхода жидкости, фирма “СИГНУР”, Россия

но его высокой точностью в широком диапазоне изменения расходов любых звукопроводящих сред с низким содержанием (порядка 1–3%) газообразных и твердых включений, малой инерционностью (0,1–1 с), возможностью измерения расхода пульсирующих и импульсных потоков, высокой чувствительностью к изменению скорости потока (~1–2 мм/с).

Поскольку излучение УЗ-колебаний происходит короткими импульсами, длительность которых на 2–3 порядка меньше периода их повторения, появляется возможность вкладывать в каждый акустический импульс достаточно высокий уровень энергии при относительно небольшой средней мощности, затрачиваемой на излучение УЗ-колебаний (энергопотребление у время-импульсных расходомеров примерно в 2–4 раза ниже, чем у расходомеров с использованием эффекта Доплера). Последнее имеет существенное значение при вводе акустических колебаний в поток жидкости непосредственно через стенку трубопровода, так как большое различие акустических сопротивлений контролируемой среды и материала трубопровода обуславливает низкий КПД передачи энергии УЗ-колебаний.

Наиболее известными приборами, реализующими время-импульсный метод измерений расхода жидкости, являются расходомеры PORTAFLOW MKII-R (MICRONICS, Великобритания), PT 868 (PANAMETRICS, Ирландия), LT860 (KROHNE, Германия), АКРОН-01 (“СИГНУР”, Россия), однако высокая стоимость импортных приборов (порядка 6–12 тысяч долларов) существенно ограничивает их применение.

Несмотря на простоту монтажа накладных УЗ-преобразователей на действующие трубопроводы, для получения достоверных результатов измерений необходимо соблюдать следующие условия:

- зачищать внешнюю поверхность трубопровода от краски и ржавчины до металлического блеска. Поверхность преобразователя и место контакта преобразователя с трубопроводом должны быть покрыты специальными желеобразными смазками, чтобы удалить воздушную прослойку, не пропускающую УЗ-колебания;

- материал трубопровода должен быть звукопроводящим. Сравнительно рыхлые материалы (бетон, теплоизолирующая обшивка, внутрен-

няя футеровка – особенно не жестко связанная с материалом основного трубопровода) часто вообще не позволяют применять расходомеры с накладными УЗ-преобразователями. “Твердые” материалы трубопровода (сталь, чугун, алюминий, ПВХ, стекло) хорошо проводят УЗ-колебания, и проблем с применением расходомеров с накладными датчиками не возникает;

- равномерность потока жидкости в трубопроводе имеет важное значение для получения достоверных результатов измерений. Так как конфигурация трубопровода около места установки накладных УЗ-преобразователей влияет на характер потока и, следовательно, может повлиять на результаты измерений, то для установки датчиков необходимо найти достаточно длинный прямолинейный участок трубопровода.

Для время-импульсных расходомеров длина прямолинейного участка трубопровода должна составлять 5–10 Ду до и не менее 5 Ду после места установки датчиков (Ду – диаметр условного прохода трубопровода).

Расходомеры, работающие на эффекте Доплера, предъявляют более строгие требования к прямолинейным участкам трубопровода (10–20 Ду до расходомера и не менее 10 Ду после него). В общем случае спектр отраженного сигнала довольно широк. В нем присутствуют гармоники различного происхождения, а не только информативные. Находящиеся в трубопроводе фланцы, клапаны, ответвления, изгибы, сужения и т. п. приводят к переменным локальным возмущениям потока, которые отражают исходный УЗ-сигнал и вносят неинформативные гармоники в спектр отраженного сигнала. Кроме того, вибрации трубопровода существенно затрудняют применение доплеровских расходомеров.

Датчики расходомеров обоих типов желательно устанавливать на полностью заполненном жидкостью горизонтальном отрезке трубопровода на боковых поверхностях, а не в вертикальной плоскости, так как отложения на дне или воздушные пузыри сверху могут препятствовать нормальному распространению УЗ-колебаний. Если нет возможности установить датчики на горизонтальном участке трубопровода, то следует выбирать для их установки вертикальный участок трубопровода с восходящим потоком жидкости. В трубопроводе с нисходящим потоком жидкости могут присутствовать пузырьки воздуха, стремящиеся вверх, что может привести к существенной погрешно-



сти измерений с помощью доплеровских расходомеров.

При использовании расходомеров с накладными датчиками особое внимание необходимо уделять определению внутреннего диаметра трубопровода Ду, так как расход жидкости вычисляется на основании измерения скорости потока и введенного оператором значения Ду.

Получить точное значение Ду (не вскрывая трубопровод) – непростая задача, особенно на старых трубопроводах. Реальное внутреннее сечение трубопровода может быть сильно искажено коррозией (за исключением пластмассовых труб), а также отложениями солей кальция, уменьшающими это сечение.

Для более точного определения внутреннего сечения трубопровода используются ультразвуковые толщинометры. Пользователю для корректного измерения расхода необходимо дополнительно приобретать УЗ-толщиномер.

Стоимость современных УЗ-толщиномеров составляет примерно 500–800 долларов. Однако расходомеры РТ 868 и АКРОН-01 имеют встроенные УЗ-толщинометры, что существенно повышает потребительские качества этих приборов.

В процессе выбора и практического использования УЗ-расходомеров с накладными датчиками необходимо учитывать все вышеизложенные обстоятельства. Поэтому при экспресс-обследованиях и инструментальном энергоаудите эти приборы незаменимы.

## Измерения расхода жидкости в безнапорных трубопроводах и каналах

Расход жидкости (в основном сточных вод) в безнапорных трубопроводах и каналах измеряется, как правило, методом переменного уровня, когда мерой расхода является определяемый уровень жидкости в выбранном измерительном сечении. Для получения устойчивой зависимости между уровнем и расходом в канал встраивают сужающее устройство – измерительный лоток или водослив.

В безнапорных трубопроводах диаметром 0,1–3,0 м и лотках U-образной формы можно производить измерение расхода по методике, разработанной Научно-исследовательским институтом коммунального водоснабжения и очистки воды (НИИКВОВ), которая не требует встраивания сужающих устройств. Суть метода состоит в измерениях скорости движения по-

тока и уровня заполнения трубопровода или лотка, при котором выполнялись эти измерения скорости. Далее следует расчет градуировочной характеристики водовода на основе полученных результатов.

Таким образом, основной задачей при измерении расхода в безнапорных трубопроводах и каналах является измерение уровня текущей жидкости. Для решения этой задачи существует несколько методов.

### ● Пьезометрический метод

Пьезометрический метод в основном применяется для вспененных потоков и при наличии сильного ветра. Пьезометрический датчик устанавливается и крепится на дне канала и измеряет гидростатическое давление столба жидкости. Расход жидкости рассчитывается исходя из этой величины и гидравлических характеристик канала.

### ● Барботажный (пневмометрический) метод

Метод применяется в основном для потоков с большим содержанием пены и пара, значительными колебаниями температуры, а также при наличии в жидкости коррозионно-активных веществ. Этим методом измеряется давление, необходимое для выдавливания пузырька воздуха через трубку, конец которой закреплен на дне канала. Гидростатическое давление столба жидкости, а значит и уровень жидкости, пропорциональны этому давлению. Так как трубка может закупориваться, ее периодически необходимо продувать. Расход жидкости определяется исходя из измеренного давления и гидравлических характеристик канала.

### ● Метод с использованием эффекта Доплера

Этот метод применяется в основном для измерения расхода загрязненных потоков, когда не требуется относительно высокая точность. УЗ-датчик устанавливается на дно канала или трубопровода и осуществляет измерение локальной скорости потока, которая может несколько отличаться от средней скорости потока. Расход воды определяется исходя из усредненной скорости потока и площади сечения. Кроме того, тем или иным способом измеряется уровень потока.

### ● Бесконтактный акустический метод

Бесконтактный акустический метод применяется для сильно загрязненных потоков.



Рис. 2

Расходомер ЭХО-Р-02, реализующий акустический метод измерения, фирма "СИГНУР", Россия

УЗ-датчик, практически не требующий обслуживания, устанавливается выше максимально возможного уровня заполнения канала или трубопровода и измеряет уровень жидкости в канале по времени распространения акустических колебаний от УЗ-преобразователя до поверхности потока. Расход жидкости определяется исходя из величины уровня заполнения и градуировочных характеристик канала или трубопровода.

Этот метод измерения получил в настоящее время наиболее широкое применение. К его достоинствам можно отнести высокую разрешающую способность (0,5–1,0 мм), малую инерционность (1–2 с) и широкий диапазон измерения уровня (от 0,01 до 10,0 м). Кроме того, если по метрологическим характеристикам все эти методы существенно не отличаются друг от друга, то эксплуатационные характеристики акусти-

ческого метода значительно выше. Этот метод измерения не требует внедрения в поток, что повышает надежность функционирования УЗ-датчиков (отсутствует возможность их коррозии), а также упрощает установку и замену прибора. В России наиболее известными приборами, реализующими акустический метод измерения, являются расходомеры ЭХО-Р-02 фирмы "СИГНУР" (Россия) и расходомеры серии 4210 фирмы ISCO (Швейцария).

Несмотря на простоту установки УЗ-преобразователя акустического расходомера, для получения достоверных результатов необходимо соблюдать следующие условия:

- измерительное сечение, т. е. сечение, в котором располагается акустический преобразователь, необходимо выбирать в середине потока или трубопровода;
- поток жидкости должен быть установившимся, для чего длина прямолинейного участка трубопровода без боковых отводов, имеющего постоянный уклон перед измерительным сечением, должна быть не менее 20, а после него не менее 10 максимальных уровней заполнения трубопровода;
- в измерительном сечении и вблизи него не должно быть местных выступов, закладных деталей и других предметов, вызывающих искажения уровня за счет местных возмущений потока;
- на погрешность измерения расхода оказывает существенное влияние погрешность калибровки трубопровода или лотка. Допускается осуществлять калибровку трубопроводов и лотков расчетным методом с использованием известной формулы Шези. Основными данными для такого расчета являются строительный уклон трубопровода и коэффициент шероховатости стенок. Однако уклон, указанный в строительной документации, часто не совпадает с реальным, а коэффициент шероховатости стенок изменяется в процессе эксплуатации. Поэтому калибровка трубопроводов и лотков расчетным методом дает менее точные результаты, чем экспериментальный метод НИИКВОВ.

В процессе выбора и практического использования расходомеров для безнапорных трубопроводов и каналов необходимо учитывать метрологические и эксплуатационные качества приборов, однако, при прочих равных параметрах, по эксплуатационным характеристикам акустический метод измерения расхода жидкости имеет существенное преимущество. ●