

**Т.Г. МАЩЕНКО**, канд. техн. наук, проф. НТУ «ХПИ»  
**Р.И. АКОЕВ**, студент НТУ «ХПИ»

## МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ РАСХОДА ДВИЖУЩИХСЯ ЖИДКОСТЕЙ

В статье приведен анализ методов и средств измерений расхода жидких и газообразных сред. В ходе анализа существующих методов и технических средств обоснован выбор наиболее перспективного и точного метода контроля расхода движущихся жидкостей.

**Ключевые слова:** расход, давление, система, расходомеры, методы анализа, измерения.

**Постановка проблемы.** Важное значение в интенсификации производства и повышении качества выпускаемой продукции играет автоматизация контрольных операций и, в особенности, системы автоматизированного управления технологическими процессами. Стремительное развитие электроники и вычислительной техники оказалось предпосылкой для широкой автоматизации самых разнообразных процессов в промышленности, однако реализация этой предпосылки в значительной мере определяется возможностями устройств для получения информации о регистрируемом параметре или процессе.

В системах управления производственными процессами и контроля качества выпускаемой продукции одним из основных регулируемых параметров является контроль расхода жидкостей, газов и сыпучих веществ непосредственно в ходе технологического процесса. Ни одна отрасль промышленности не обходится без расходомеров. Это расходомеры нефти и природного газа, расходомеры воды и пара для отопления жилищ и промышленных предприятий, расходомеры молока и муки для расфасовки в пакеты и бутылки. Это, наконец, расходомеры-счетчики питьевой и горячей воды, без которой немислим сегодня ни один дом.

В условиях резкого повышения спроса на энергоресурсы и их стоимости каждый хочет знать о своем расходе ресурсов от первичных производителей до конечных потребителей. При этом точность измерения ресурсов, будь то мука или бензин, приобретает первостепенное значение[1].

Значения измеряемых расходов могут лежать в диапазоне от тысячных долей кубометров до нескольких тысяч кубических метров в час. В то же время расходомерные вещества могут сильно отличаться по своим физико-химическим свойствам. Это может быть нефть, нейтральные жидкости, электролиты, жидкие металлы, газы и т.д. Все это в сочетании с разнообразными условиями применения и различными требованиями к точности надежности и

стоимости определяет значительное число типов и конструкций средств автоматического измерения расхода, а также потребность в разработке более новых, более современных расходомеров.

**Цель статьи.** Оценить достоинства и недостатки современных методов измерения расхода жидкостей и газов, а также обосновать выбор наиболее перспективного и точного метода для контроля расхода движущихся жидкостей.

**Основной раздел.** Расходомер, как видно из названия — устройство, предназначенное для измерения расхода какого-либо вещества — как правило, жидкости или газа. Если имеется канал диаметром  $d$  и по нему со средней скоростью  $v_{\text{ср}}$  перемещается жидкость или газ, то расходом является величина:

$$Av_{\text{ср}} = \int v dA, \quad (1.1)$$

где  $A=\pi d^2/4$  — площадь поперечного сечения канала.

Следует сразу отметить, что вещества, расход которых необходимо измерить, могут быть сжимаемыми (газ) или несжимаемыми (жидкость), и методики измерения расхода в обоих случаях имеют свои особенности.

Независимо от типа используемого устройства определения расхода вещества является довольно сложной комплексной задачей, при решении которой приходится учитывать множество факторов, таких как:

- физические характеристики исследуемой среды.
- физические характеристики окружающей среды.
- форма канала и свойства материала, из которого он изготовлен.

К каждому датчику, как правило, прилагается набор документов, описывающих технические параметры прибора, его ограничения и рекомендации по эксплуатации.

Среди довольно большого разнообразия расходомеров по принципу действия можно выделить следующие основные группы:

- турбинные и шариковые расходомеры;
- вихревые расходомеры;
- ультразвуковые расходомеры;
- электромагнитные расходомеры;
- микро расходомеры;
- кориолисовские расходомеры;
- расходомеры с мишенями;
- детекторы изменения скорости потока.

Рассмотрим основные виды расходомеров. Одними из первых появились **турбинные расходомеры**. Еще в Древнем Египте заметили, что скорость водяного колеса прямо пропорциональна скорости движения воды в Ниле.

Винт Архимеда, использовавшийся в Месопотамии, также показал, что скорость вращения турбины пропорциональна скорости потока воды, протекающей через поливочный трубопровод. Для увеличения скорости вращения жерновов на мельницах приоткрывали шлюзовую заслонку, в результате чего увеличивались объем и скорость падающей на лопасти водяного двигателя воды, что приводило к увеличению числа оборотов приводного вала. Но лишь спустя тысячелетия появились первые крыльчатые и турбинные приборы, позволяющие измерять как скорость ветра на море (анемометры), так и скорость движения жидкостей и газов в трубопроводах [2].

Преимуществами крыльчатых и турбинных расходомеров являются их сравнительная простота, отсутствие электронных устройств в конструкции расходомеров, менее жесткие требования к наличию прямых участков измерительных трубопроводов. Однако крыльчатым, турбинным и шариковым расходомерам присущи следующие серьезные недостатки:

- вероятность засорения опорных подшипников осей турбин, что требует особой конструкции этих подшипников (невозможно выполнить для всех сред);

- вероятность отложения загрязнений на лопастях турбин (крыльчатках), особенно при работе в загрязненных средах природного газа и в насыщенной известью воде;

- сильная зависимость показаний величины расходов газов от величины избыточного давления в измерительном трубопроводе, что требует установки перед такими счетчиками систем поддержания постоянного давления;

- необходимость применения электронных вычислителей-корректоров в средах с переменной температурой, плотностью и давлением, что сильно удорожает систему;

- трудность съема показаний с механического счетчика при интеграции приборов в систему АСУ ТП.

В связи с данными обстоятельствами крыльчатые, турбинные и шариковые расходомеры все реже используются для систем учета и технологических измерений в промышленности и энергетике. Единственной областью применения, где с ними на сегодня еще не могут конкурировать другие расходомеры, является учет холодной и горячей воды в жилищно-бытовом секторе [2].

Принцип действия **расходомеров переменного перепада давления** основывается на том, что при протекании потока через сужающее устройство скорость его повышается по сравнению со скоростью до сужения, а статическое давление падает. По измеренным температуре и избыточному давлению определяется плотность среды. Зная диаметр трубопровода, плотность среды и перепад давления, можно определить мгновенную скорость потока, которая через известную площадь поперечного сечения трубопровода пересчитывается в объемный расход. Для реализации этого метода используются стандартные сужающие устройства – диафрагмы, сопла и трубы Вентури. Величина расхода определяется в соответствии с выражением

$$G = \beta \left( \frac{\pi D^2}{4} \right) \sqrt{\Delta P}, \quad (1.2)$$

где  $\beta$  – коэффициент пропорциональности;

$D$  – внутренний диаметр трубопровода;

$\Delta P$  – величина перепада давления.

Как и для многих других расходомеров, применение этого метода требует выполнения комплекса определенных условий:

- фазовое состояние потока не должно изменяться при прохождении сужающего устройства (к примеру, пар после прохождении диафрагмы не должен конденсироваться, вода вскипать);

- поток до и после сужения должен быть ламинарным, что требует значительных длин прямых участков до и после сужающих устройств, особенно после местных сопротивлений (насосы, клапаны);

- загрязнение среды не должно превышать предельных значений.

Принцип действия электромагнитных расходомеров базируется на законе электромагнитной индукции Фарадея. В соответствии с ним в электропроводящей жидкости, пересекающей магнитное поле, индуцируется электродвижущая сила, пропорциональная скорости движения жидкости. Конструктивно электромагнитные расходомеры выпускаются двух типов: для заполненных и частично заполненных трубопроводов. И в том, и в другом случае электропроводящая среда протекает в круглом трубопроводе, в котором создается магнитное поле с силовыми линиями, перпендикулярными направлению потока. В полностью заполненных трубопроводах индуцированное в рабочей среде напряжение снимается одной парой диаметрально установленных электродов. В частично заполненных трубопроводах индуцированное в рабочей среде напряжение снимается несколькими парами электродов, установленных на хордах, поэтому при опускании уровня жидкости всегда оказываются задействованными несколько пар электродов [3].

Достоинствами электромагнитных расходомеров являются:

- идентичность показаний величины расхода в полностью заполненных трубопроводах как для турбулентного, так и для ламинарного потоков;

- независимость показаний от вязкости и плотности среды;

- возможность реализации метода для очень больших диаметров трубопроводов и отсутствие при этом дополнительного динамического сопротивления;

- работоспособность при высоких давлениях среды – вплоть до 100 МПа.

К недостаткам следует отнести:

- невозможность использования расходомеров для непроводящих жидкостей (углеводороды, аммиак, кислоты и др.);

-наличие дополнительной погрешности от величины электропроводности жидкости, что вообще невозможно учесть в практике измерений, так как электропроводность среды (например, сетевой воды) может изменяться в течение года в десятки раз;

- возможность отложения магнетита на стенках измерительного трубопровода расходомера и значительное увеличение погрешности при наличии окислов железа в воде;

- необходимость разрезки трубопровода, приварки фланцев и установки измерительного трубопровода, что часто невыполнимо.

Одними из наиболее распространенных приборов измерения расхода и количества жидкостей, и газов являются расходомеры и счетчики **с ультразвуковыми первичными преобразователями**. Ультразвуковые расходомеры (УЗР) имеют ряд важных преимуществ:

-позволяют измерять расход с высокой точностью в широком динамическом диапазоне;

-не создают потери напора за счет отсутствия элементов прибора в измерительном канале;

-не влияют на гидродинамику потока;

-обладают повышенной надежностью за счет отсутствия подвижных элементов;

-обеспечивают возможность измерения расхода нефтепродуктов, агрессивных, неэлектропроводных, непрозрачных и неоднородных жидкостей (суспензий, пульп), в том числе многокомпонентных сред;

-низкое энергопотребление;

-предоставляют возможность имитационной поверки без демонтажа первичного преобразователя;

-предоставляют возможность монтажа без остановки технологического процесса (для накладных приборов);

-сохраняют технико-эксплуатационные характеристики во времени.

Кроме того, УЗР обладают высоким быстродействием и стабильностью метрологических характеристик (за исключением трубопроводов с малыми диаметрами), а линейная зависимость исходного сигнала от расхода и электронный выход определяют удобство применения этих расходомеров в системах автоматического управления и регулирования [4-6]. Как показывает уже имеющийся опыт, наиболее информативными являются измерение расхода жидких и газообразных сред на основе пьезоэлектрических преобразователей. Метод измерения ультразвуковыми расходомерами основывается на соотношении скоростей распространения акустических колебаний в неподвижной среде и самой среды. Многообразии параметров, которые зависят от скорости измеряемой среды, и предопределило большое количество способов измерения задержки прохождения сигнала от излучателя к приемнику и обратно. С дальнейшим развитием расходомеров данного типа преимущество предоставляется тем приборам, метрологические характеристики которых не

зависят от условий эксплуатации — температуры, давления, концентрации примесей, и т.п. [7].

В настоящее время известны три метода измерения расхода вещества с помощью ультразвука. Метод, основанный на разности времен распространения ультразвуковых волн, направленных за потоком и против него. Ультразвуковые колебания перемещаются подвижной средой. Поверхностью отражения для импульса зондирования является естественная внутренняя поверхность трубопровода или специальный экран непосредственно в измеряемой среде. При этом средняя скорость измеренной среды может определяться на основании эффекта сноса ультразвукового колебания подвижной средой и изменения времени прохождения луча как векторная разность скоростей ультразвуковых колебаний по направлению движения измерительной среды и против нее.

Измерительные схемы основаны на измерении разности времен, сдвига фаз, разности частот прохождения ультразвуковых сигналов, обусловленных скоростью потока

$$\Delta\tau = \frac{2LQB}{c^2 - (\sin\beta QB)^2}, \quad (1.3)$$

где  $Q$  — расход;

$B(Re, \rho, \mu, t, P, \varepsilon, D)$  — функция, зависящая от параметров измеряемой среды и параметров трубопровода;

$L$  — путь ультразвукового луча;

$Re$  — число Рейнольдса измеряемой среды;

$\rho$  — плотность измеряемой среды;

$\mu$  — вязкость измеряемой среды;

$t$  — температура измеряемой среды;

$P$  — давление измеряемой среды;

$\varepsilon$  — шероховатость трубопровода;

$D$  — диаметр трубопровода;

$c$  — скорость ультразвука в измеряемой среде;

$\beta$  — угол ввода ультразвукового луча относительно вертикали.

Второй метод, основанный на геометрическом сносе ультразвуковой волны (с лучом перпендикулярным к потоку), обусловленном движением потока вещества. Ультразвуковые волны излучаются в измеряемую среду по нормали к направлению движения потока. Два приемных пьезоэлемента устанавливаются рядом таким образом, что при неподвижном измеряемом потоке интенсивности колебаний, принятых каждым пьезоэлементом, равны. При движении измеряемого потока ультразвуковые волны распространяются в направлении потока, при этом интенсивность ультразвуковых колебаний на приемных пьезоэлементах разная. Измеренная разность сигналов на приемных пьезоэлементах является мерой расхода потока вещества. Метод приме-

ним для измерения в трубопроводах больших диаметров и при больших скоростях потоков. По своей сути данный метод отличается от описанного выше тем, что измеряется не время, а геометрический снос луча.

Третий метод, основанный на доплеровском сдвиге частоты ультразвукового сигнала, отраженного от частиц измеряемого потока. Передающий пьезоэлемент излучает гармонический ультразвуковой сигнал в измеряемую среду. Приемный пьезоэлемент воспринимает отраженный от неоднородностей потока, имеющий доплеровский сдвиг частот, сигнал. Мерой расхода является доплеровская разность частот излучаемого и отраженного сигналов:

$$\Delta f_{\text{д}} = \frac{f_1 (\cos \alpha_1 - \cos \alpha_2) QV}{C} \quad (1.4)$$

где  $f_1$  — исходная частота ультразвуковых колебаний;

$\alpha_1$  — угол между вектором скорости частицы отражателя и направлением исходного луча;

$\alpha_2$  — угол между вектором скорости частицы отражателя и направлением отраженного луча;

$C$  — скорость ультразвука.

Для высокоточных измерений расхода целесообразно применять метод, основанный на разности времен распространения ультразвуковых волн, направленных по потоку и против него. Вследствие небольшой чувствительности, крутизны градуировочной характеристики невозможно получить высокую точность измерений методом геометрического сноса ультразвуковой волны. Доплеровский метод наиболее широко применяется для измерения локальных скоростей, а в области измерения расхода имеет ограниченные возможности.

**Вывод:** Такое обилие и разнообразие конструкций и схем УЗР вызвано постоянным совершенствованием ультразвукового метода, как наиболее перспективного метода измерения расхода и количества вещества. Те или иные конструкции специально создавались для определенных условий. Так, например, накладные УЗР просто незаменимы в случаях, когда необходимо проводить учет энергоносителя без остановки технологического процесса. А многоканальные УЗР характеризуются высокой точностью измерения, но при этом имеют большую стоимость.

**Список литературы:** 1. *Гуртовцев А.Л.* Комплексная автоматизация учета и контроля электроэнергии, и энергоносителей на промышленных предприятиях и их хозяйственных объектах // Промышленная энергетика. — 2002. — № 8. — С. 7-14. 2. *Дмитрий Тросников, Владимир Жук.* Расходомеры: принципы работы и опыт эксплуатации // Энергетика и ТЭК. — 2008. — №4(61). 3. *Дмитрий Тросников, Владимир Жук.* Расходомеры: принципы работы и опыт эксплуатации // Энергетика и ТЭК. — 2008. — №5(62). 4. *Кремлевский П.П.* Расходомеры и счетчики количества: Справочник. — Л.: Машиностроение, 1989. — 701с. *Лобачев П.В., Шевелев Ф.А.* Измерение расхода жидкостей и газов в системах водоснабжения и канализации. — М.: Стройиздат, 1985. —

424 **6.** Киясбейли А.Ш., Измайлов А.М., Гуревич В.М. Частотно-временные ультразвуковые расходомеры и счетчики. — М.: Машиностроение, 1984. — 128 с. **7.** Коробко И.В., Гришанова И.А., Писарец А.В., Кузьменко П.К. Использование приборов коммерческого учёта на Украине // Энергосбережение (Москва). — 2005. — № 3 — С. 36-40.

**Bibliography (transliterated):** **1.** Gurtovcev A.L. Kompleksnaja avtomatizacija ucheta i kontrolja jelektroenergii, i jenergonositelej na promyshlennyh predpriyatijah i ih hozjajstvennyh ob#ektah // Promyshlennaja jenergetika. — 2002. — № 8. — S. 7-14. **2.** Dmitrij Trosnikov, Vladimir Zhuk. Rashodomery: principy raboty i opyt jekspluatcii // Jenergetika i Tjek. —2008. — №4(61). **3.** Dmitrij Trosnikov, Vladimir Zhuk. Rashodomery: principy raboty i opyt jekspluatcii // Jenergetika i Tjek. —2008. — №5(62). **4.** Kremlevskij P.P. Rashodomery i schetchiki kolichestva: Spravochnik. — L.: Mashinostroenie, 1989. — 701 **5.** Lobachev P.V., Shevelev F.A. Izmerenie rashoda zhidkostej i gazov v sistemah vodosnabzhenija i kanalizacii. — M.: Strojizdat, 1985. — 424 **6.** Kijasbejli A.Sh., Izmajlov A.M., Gurevich V.M. Chastotno-vremennye ul'trazvukovye rashodomery i schetchiki. — M.: Mashinostroenie, 1984. — 128 s. **7.** Korobko I.V., Grishanova I.A., Pisarec A.V., Kuz'menko P.K. Ispol'zovanie priborov kommercheskogo uchjota na Ukraine // Jenergosberezhenie (Moscow). — 2005. — № 3 — p. 36-40.

*Поступила (received) 24.05.2013*