

УДК 621.317

И. И. Билинский, д. т. н., проф.; М. А. Стасюк; М. В. Гладышевский**АНАЛИЗ МЕТОДОВ И СРЕДСТВ КОНТРОЛЯ РАСХОДА ЖИДКИХ И ГАЗООБРАЗНЫХ СРЕД И ИХ КЛАССИФИКАЦИЯ**

В статье проанализированы основные методы и средства контроля расхода жидких и газообразных сред, разработана их классификация. Это позволяет выбрать расходомер, который соответствовал бы индивидуальным требованиям.

Ключевые слова: расходомер, контроль расхода, классификация, динамический диапазон, надежность, точность измерения, подвижные части.

Введение

В связи с ежедневным ростом цен на различные виды энергии важной задачей современности является максимально точный контроль расхода жидких и газообразных сред.

Газ в Украине и других странах СНГ – базовый энергоноситель и источник других видов энергии – электрической и тепловой. Кроме того, газ – это товар и предмет коммерческих соглашений между добывающей компанией, газотранспортными компаниями и конечными потребителями.

Основная проблема коммерческих отношений при поставках жидких и газообразных сред – это дисбаланс, возникающий при физическом учете от поставщика к потребителю. Общими факторами, определяющими возникновение этого дисбаланса, являются погрешности в измерении объема вещества, отсутствие достоверного учета из-за невысокой точности и ограниченный диапазон счетчика, неисправности узлов учета [1]. Во избежание такого дисбаланса необходимо выбрать расходомер, имеющий все необходимые характеристики для обеспечения точного измерения расхода.

Контроль расхода жидких и газообразных сред является важным для металлургии, пищевой промышленности, строительства, биохимии, производства обогащения руды и других отраслей промышленности.

Целью работы является анализ методов и средств контроля расхода жидких и газообразных сред и разработка классификации на их основе.

Основная часть

Сегодня существует огромное количество расходомеров, которые используют для коммерческого и технологического контроля потоков жидкостей, газа и пара. На основе проведенного анализа методов контроля расхода вещества [2 – 34] и уже существующей классификации [35] предложена новая, усовершенствованная классификация (рис. 1), в основе которой лежат четыре основных классификационных признака, а именно: по измеряемой величине расходов, по физическим явлениям, по принципу работы, по эффектам, лежащим в основе работы и особенностью конструкции.

Расход вещества – это количество вещества (жидкости или газа), протекающего через сечение трубопровода за единицу времени. Различают объемный расход Q_V , который измеряют в единицах объема за единицу времени, и массовый расход Q_M соответственно:

$$Q_V = V / t ; \quad (1)$$

$$Q_M = M / t , \quad (2)$$

где V – объем жидкости или газа, которые прошли через сечения трубы за время t ; M –

масса жидкости или газа, которые прошли через сечение трубы за время t [2].

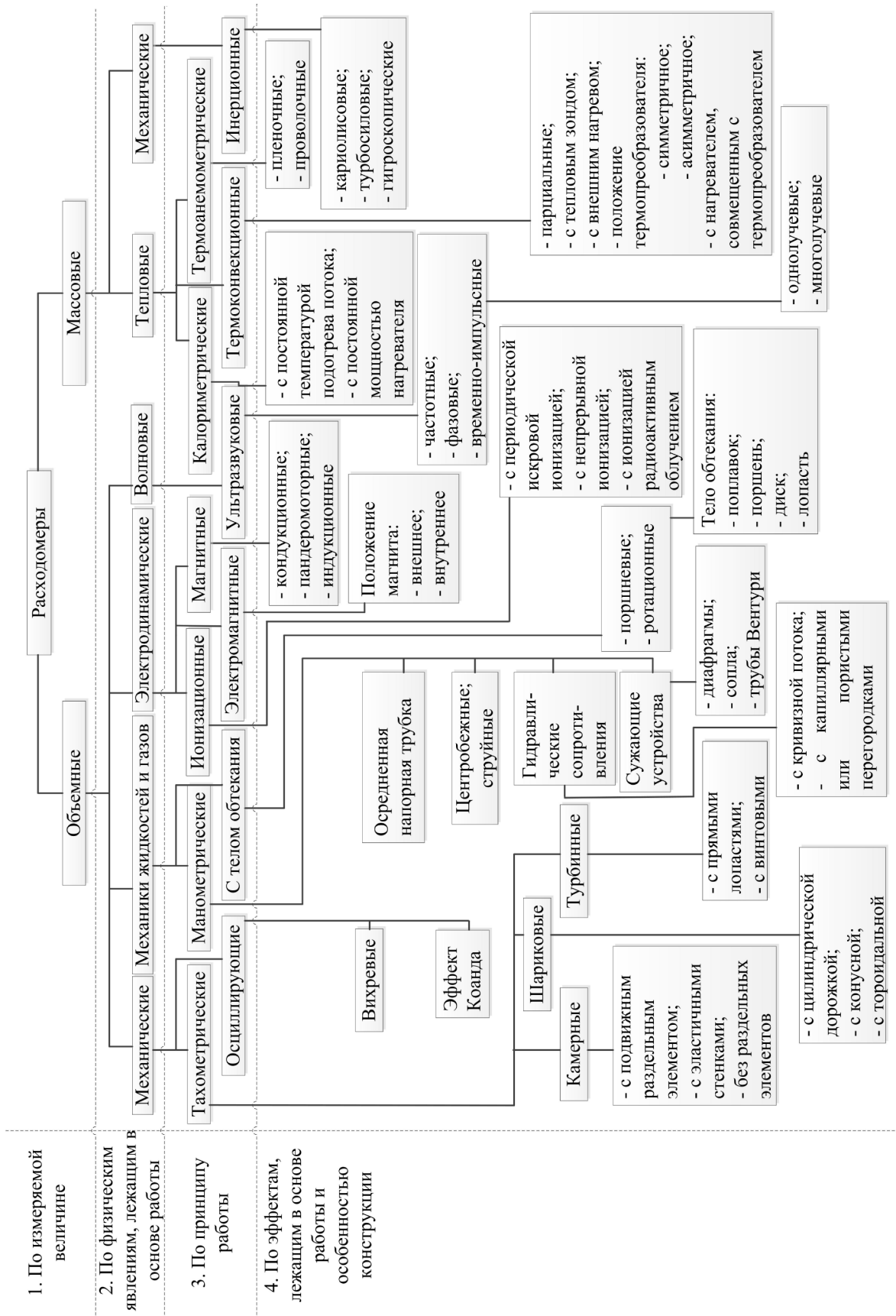


Рис. 1. Классификация методов и средств измерения расхода

Таким образом, по измеряемой величине различают объемные и массовые расходомеры.

По физическим явлениям, положенным в работу, расходомеры объема делят на механические, механики жидкостей и газов, электродинамические, волновые, а массовые счетчики – на тепловые и механические.

Согласно принципу работы к объемным механическим расходомерам принадлежат тахометрические и осциллирующие расходомеры, а к массовым механическим – инерционные.

По используемым эффектам, в тахометрических расходомерах можно выделить три основные группы: камерные (другие названия: диафрагменные или мембранные), турбинные и шаровые [3]. Чаще всего используют первые два вида.

Камерные расходомеры предназначены для измерения расхода прозрачных жидкостей в замкнутых трубопроводах [4]. Принцип работы таких счетчиков основан на разнице давлений, что является следствием закона сохранения энергии, согласно которому сужение канала прохождения потока вещества вызывает увеличение скорости потока, а следовательно, и увеличение кинетической энергии. Это приводит к падению давления вещества в узкой части такого канала, поскольку кинетическая энергия увеличивается за счет энергии давления. При этом происходит перемещение подвижных перегородок измерительных камер под давлением исследуемого газа. Зависимость между падением давления и расходом описывают:

$$Q = K\sqrt{\Delta P}, \quad (3)$$

где Q – расход вещества; K – константа для данного прибора; ΔP – разница давлений на концах сужения (это значение зависит от диаметра канала сужения) [5].

Камерные расходомеры характеризуют следующие преимущества:

- 1) возможность использования на (в) трубах с большим диаметром;
- 2) не требуют значительных затрат при монтаже;
- 3) проверены временем, обеспечивают надежную работу в течение многих лет;
- 4) экономичный вид учета при небольших колебаниях расхода;
- 5) отсутствие движущихся частей;
- 6) место установки, монтажное положение и направление потока не влияют на их работу [6].

К недостаткам вышеописанных расходомеров относят:

- 1) динамический диапазон ограничен значением 4 : 1 или 5 : 1;
- 2) возможно блокирование системы из-за изгиба диафрагмы от гидравлического удара;
- 3) установочная длина измерительной системы может иметь большое значение;
- 4) из-за эрозии может меняться геометрия кромок отверстия, что снижает точность всей системы [7].

Производителями камерных расходомеров являются известные международные компании: ООО «АППЭК» (компактный расходомер OriMaster, Россия), Mescon (расходомер FON4, Германия), Siemens (Германия), PietroFiorentini (Италия).

Турбинные расходомеры работают по принципу счетчиков с крыльчаткой Вольдмана, то есть регистрируют объем, проходящий через сечение, используя при этом среднюю скорость потока [8].

Такие расходомеры в основном применяют на предприятиях с очень высоким потреблением природного газа, а также на магистралях с относительно высоким давлением. Современный счетный механизм турбинного расходомера – это своеобразная компьютерная мини-система. Она не только считает импульсы и переводит их в цифровой эквивалент, но и следит за правильностью работы счетчика, сигнализирует о несанкционированном вмешательстве в его работу. В последнее время такие механизмы оснащают модемами, благодаря которым все показания направления передают на серверы служб поддержки [6].

На турбинных счетчиках необходимо периодически контролировать изменение перепада давления. Допустимое значение перепада давления на счетчике для конкретных условий

эксплуатации рассчитывают по формуле:

$$\Delta P = \Delta P_p \left(\frac{\rho_c \cdot P}{\rho_{cp} \cdot P_p} \right) \cdot \left(\frac{Q}{Q_p} \right)^2, \quad (4)$$

где ΔP_p – перепад давления на счетчике, регламентированный в технической документации, Па; P – давление газа (абсолютное) при конкретных рабочих условиях, МПа; P_p – значение давления газа при стандартных условиях, для которых регламентированы потери давления; ρ_c – значение плотности газа при стандартных условиях; ρ_{cp} – значение плотности газа при стандартных условиях, для которых регламентированы потери давления; Q – расход газа при конкретных рабочих условиях, м³/час; Q_p – расход газа, для которого регламентированы потери давления, м³/час [9].

Поскольку турбинный расходомер состоит из нескольких подвижных деталей, необходимо учитывать следующие факторы:

- 1) смазочные свойства среды;
- 2) изменение состояния и размеров лопастей;
- 3) износ подшипников и трение;
- 4) температуру, давление и вязкость измеряемой среды;
- 5) падение давления на расходомере;
- 6) профиль скорости на входе и эффекты завихрений.

Именно из-за этих факторов необходимо выполнять калибровку и проверку турбинных счетчиков в рабочих условиях.

К основным преимуществам расходомеров относят:

- 1) высокую точность ($\pm 0,5\%$ от фактического значения);
- 2) максимальный динамический диапазон до 10 : 1;
- 3) расходомеры с байпасными каналами относительно дешевые [7];
- 4) энергонезависимость;
- 5) низкий уровень шума [10].

Турбинные счетчики чувствительны к искажениям потока на входе и на выходе расходомера, хотя современные требования к длинам прямых участков до и после устройства являются минимальными и составляют, соответственно, 2 и 1 диаметра условного прохода расходомера. Также к недостаткам относят повышенную погрешность при измерении пульсирующих потоков газа.

Рекомендуют выбирать расходомеры тех типов, в которых счетчик температуры и отверстие для отбора давлений размещены в корпусе. Не желательно устанавливать счетчики на участках, где возможно накопления конденсата [11].

Среди производителей турбинных расходомеров известные компании «Elster Instromet», «КОНВЕЛС Автоматизация» (Россия), «Advantek Engineering» (США), «Cameron» (США), «Actaris» (Россия).

Осциллирующие расходомеры делятся на вихревые счетчики и счетчики с использованием эффекта Коанда. Самыми распространенными расходомерами этого класса являются вихревые, которые применяют на масштабных предприятиях, где происходит потребление значительного количества природного газа. Как и в турбинных расходомерах, счетный механизм вихревого расходомера представляет собой компьютерную мини-систему. Важными преимуществами этой системы являются нечувствительность к пневмоударам и возможность работы на загрязненных газах [6].

В задней части тела особой формы, обтекаемого потоком среды, образуются завихрения. Эти завихрения образуют так называемую дорожку Кармана. Срыв завихрений с обтекаемого тела

можно обнаружить и рассчитать. В некотором диапазоне их количество пропорционально расходу, что позволяет измерить скорость движения среды [12].

Частота образования вихрей и скорость среды имеют почти линейную зависимость, которую определяют:

$$f = S_t \cdot (v/d), \quad (5)$$

где f – частота возникновения вихрей; S_t – число Струхала, которое определяют экспериментально; v – скорость потока среды; d – ширина тела обтекания [12].

Частота образования завихрений не меняется при изменении плотности среды [13].

К преимуществам вихревых расходомеров относят:

- 1) довольно большой динамический диапазон;
- 2) малое сопротивление потока;
- 3) отсутствие подвижных деталей;
- 4) линейный выходной сигнал;
- 5) небольшая потеря давления;
- 6) простота и надежность в эксплуатации, поскольку пьезодатчики не контактируют со средой [12].

Недостатками вихревых счетчиков являются:

- 1) возможное влияние вибрации на точность измерений;
- 2) значительную роль играет правильная установка;
- 3) максимальные расходы соответствуют скоростям потока 80 или 100 м / с;
- 4) недостаточная стабильность коэффициента преобразования в необходимом диапазоне, что практически не позволяет рекомендовать устройства данного типа для коммерческого учета газа без предварительной калибровки в условиях эксплуатации;
- 5) необходимо предусмотреть прямые участки трубы до и после расходомера без препятствий [14].

Известна фирма-производитель «Endress + Hauser» ProlineProwirl [15]. Другими производителями таких расходомеров являются ИПФ «Сибнефтеавтоматика» (Россия), «Emerson» (расходомеры Rosemount, США), корпорация «Yokogawa Electric Corporation» (расходомеры YEWFL0, Япония).

Объемные расходомеры механики жидкостей и газов по принципу действия делятся на счетчики с телом обтекания и манометрические. К расходомерам с телом обтекания принадлежат поршневые и ротационные.

Ротационный расходомер – это один из первых типов газовых счетчиков, которые начали использовать для подсчета расхода газа. Эти расходомеры в целом используют на предприятиях, где потребление природного газа не превышает 200 кубометров в час [6]. Принцип работы таких расходомеров основан на вращении двух соосно расположенных роторов под воздействием потока газа. Отсчетное устройство показывает количество газа (м^3), которое прошло через счетчик при рабочем давлении P и температуре T . Пересчет в объемные единицы V_H к условиям по ГОСТ 2939 проводят по формуле:

$$V_H = V_p \frac{P \cdot T_H}{T \cdot K \cdot P_H}, \quad (6)$$

где V_p – разность показаний счетчика за период измерения, м^3 ; P – абсолютное давление газа, МПа; T – абсолютная температура газа, К; K – коэффициент сжатия газа; $P_H = 0,101325$ МПа и $T_H = 293,15$ К – соответственно стандартные давление и температура по ГОСТ 2939 [16].

Такой расходомер является долговечным, имеет высокую пропускную способность при относительно небольших размерах и массе, выдерживает перегрузки, автоматический

перерасчет объема газа производят с помощью корректоров (вычислителей) [17].

Несмотря на вышеприведенные преимущества, ротационный расходомер имеет ряд недостатков, к которым относят высокую стоимость, также измерительная система счетчика требует тщательной подгонки всех деталей и не способна работать при загрязненном газе [15].

Среди производителей ротационных расходомеров выделяют бельгийскую фирму «Instromet International», НПП «Овен-Урал» и ООО ЭПО «Сигнал» (Россия), предприятие «Actaris» и компанию «Elster Instromet» (Германия).

К манометрическим расходомерам относят счетчики на основе гидравлических сопротивлений, сужающих устройств. Также большой группой манометрических расходомеров являются струйные, центробежные счетчики и осредненная напорная трубка.

Струйные счетчики нашли широкое применение в теплоэнергетике, медицине, топливной и химической промышленности, их также используют для коммерческого и технологического контроля потоков жидкостей, газа и пара.

Струйные расходомеры позволяют измерять небольшой расход газа, поскольку обладают низким порогом чувствительности [17]. Принцип работы заключается в измерении частоты переключения струйного автогенератора (САГ), пропорциональной скорости расхода газа. Частота колебаний потока пропорциональна расходу через сопло САГ:

$$f = Sh \cdot \frac{q}{l \cdot b \cdot h}, \quad (7)$$

где Sh – число Струхала; l, b, h – характерные размеры, соответственно – длина камеры, ширина и глубина сопла струйного элемента.

В соответствии с формулой расхода

$$q = \mu \cdot h \cdot b \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta p}{\rho}} \quad (8)$$

получаем, что частота колебаний потока САГ пропорциональна перепаду давления на струйном элементе (скорости потока через него) и плотности среды [19]:

$$f = Sh \cdot \frac{\mu}{l} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta p}{\rho}}. \quad (9)$$

Так что этот метод похож на вихревой с телом обтекания, поскольку в обоих случаях обеспечивается создание аэродинамического генератора колебаний.

В зависимости от формы струи, а следовательно, и принципа функционирования, эти расходомеры в свою очередь разделяют еще на три группы:

1. Расходомеры с осциллирующей струей (разновидность вихревых расходомеров). Как и в вихревом методе, здесь используют принцип создания аэродинамического генератора колебаний с частотой, пропорциональной расходу газа [17, 19]. Расходомеры этой группы, кроме прочих недостатков, имеют также очень большие размеры струйного элемента по отношению к величине измеряемого расхода и нестабильный коэффициент преобразования.
2. Ударно-струйные расходомеры. Эти расходомеры измеряют зависимый от расхода перепад давления, возникающий при ударе струи жидкости или газа. Такие счетчики используют только для измерения малых расходов.
3. Расходомер с отклонением исходящей струи. Принцип действия заключается в зависимости перепада давления от измеряемой скорости газа, возникающего при отклонении струи вспомогательного газа или жидкости [19].

Производителями струйных расходомеров являются российские компании «Газовик»,

ООО «Глобус», ГК «Промприбор», «ТБН энергосервис».

К стандартным сужающим устройствам относят диафрагмы, сопла и трубы Вентури. Преимуществами такого метода являются: возможность реализации метода без использования сложных микропроцессорных устройств, измерение расхода при малых скоростях протекания жидкостей или газов (0,1 ... 0,5 м / с) и высокая устойчивость к загрязненной измеряемой среде.

Недостатками таких устройств являются:

- 1) высокая трудоемкость монтажа;
- 2) невысокая точность при небольшом диапазоне измерения расхода (1: 3);
- 3) значительная потеря давления на сужающих устройствах, которая в свою очередь приводит к дополнительным затратам на работу насосов [20].

Именно поэтому было целесообразным введение нового метода «площадь-скорость» с использованием усредненной напорной трубки.

Этот прибор создает перепад давлений пропорционально квадрату скорости потока согласно теореме Бернулли: суммой энергий в какой-либо точке трубы является сумма статической энергии (давление, создаваемое веществом во всех направлениях); кинетической (скорость вещества) и потенциальной (гравитационная составляющая). В таком случае теорема Бернулли записывают:

$$\frac{v_1}{2g} + \frac{p_1}{\rho} = \frac{v_2}{2g} + \frac{p_2}{\rho}, \quad (10)$$

где v – скорость потока; g – гравитационная постоянная; p – давление; ρ – плотность вещества [21].

Усредненная напорная трубка находит применение более, чем в миллионе расходомерных узлов и в трубах с большим диаметром. Это объясняется стабильной и точной работой с хорошей повторяемостью результата. Также прибор обладает существенными преимуществами перед традиционными суживающими диафрагмами благодаря простоте установки и низким потерям давления.

Недостатком расходомеров переменного перепада давления является низкая точность их применения при измерении малых расходов в трубах небольшого диаметра (менее 50 мм) и пульсирующих потоков [21].

Промышленный выпуск усредненных напорных трубок налажен некоторыми зарубежными фирмами. Например, фирмой в США Hanejwell (австрийский филиал) выпускает расходомеры с напорными трубками типа Annubar.

Объемные электродинамические расходомеры делятся на ионизационные, магнитные и электромагнитные расходомеры.

Принцип действия ионизационных расходомеров заключается в измерении интенсивности излучения, направленного поперек потока. Для уменьшения погрешности от изменчивости источника излучения преимущественно используют дифференциальные преобразователи с двумя приемниками ионизации потока (или ультразвукового излучения) [22].

К недостаткам таких расходомеров следует отнести влияние параметров газа, температуры и давления на величину ионизации. Устранение этих факторов значительно усложняет конструкцию импульсных и чувствительных элементов. Кроме того, ионизационные счетчики не могут применять для измерения расхода сильно ионизированных и раскаленных газов [23].

Разработчиком ионизационных расходомеров является ООО «Прамень».

Принцип действия магнитно-индуктивных расходомеров основан на измерении пропорциональной расходу ЭДС, которая индуцирована в потоке электропроводящего вещества под действием внешнего магнитного поля (закон Фарадея). Согласно этому закону для любого замкнутого контура индуцированная электродвижущая сила (ЭДС)

пропорциональна скорости изменения магнитного потока, проходящего через этот контур.

Главным преимуществом таких счетчиков является то, что первичные преобразователи не имеют частей, которые выступают внутрь трубопровода, а изоляционные и антикоррозийные покрытия позволяют измерять расходы агрессивных и абразивных сред [24].

Недостатком магнитно-индуктивных расходомеров с постоянным магнитом является поляризация чувствительных элементов, которая приводит к изменению сопротивления преобразователя. Это вызывает появление дополнительных погрешностей. Кроме этого, расходомеры чувствительны к неоднородностям потока, турбулентности и неравномерности распределения скоростей потока в сечении канала.

Несмотря на недостатки, магнитно-индуктивные расходомеры нашли широкое применение в металлургии, пищевой промышленности, в строительстве, биохимии, производстве обогащения руды, в медицине, поскольку они имеют небольшую инерционность по сравнению с расходомерами других типов [25].

Производителями являются: «Krohne», «Siemens», «Honeywell» (США).

Сегодня приобрел популярность еще один метод измерения расхода – ультразвуковой. Он заключается в зависимости времени распространения ультразвуковых колебаний через поток газа в трубопроводе заданного диаметра [26].

Разница времени $\Delta\tau$ прямо пропорциональна скорости потока V :

$$\Delta\tau = \frac{2L}{c^2} v, \quad (11)$$

где c – скорость звука в среде; L – расстояние прохождения ультразвуковых колебаний [27].

В ультразвуковом счетчике находятся пары первичных преобразователей. Наличие нескольких пар позволяет получать более точные значения расхода. Каждый из датчиков способен принимать и передавать сигнал. Измерение времени прохождения сигнала между каждой парой происходит одновременно. Сигнал генерируют пьезоэлектрические кристаллы, к которым прикладывается напряжение, и наоборот, когда ультразвуковая волна ударяется о кристалл, на кристалле появляется напряжение. Увеличивая количество пар датчиков, можно точно определить и математически компенсировать искажения профиля потока во всем сечении трубы. Когда в трубе отсутствует движение вещества, время передачи сигнала одинаковое по потоку и против потока. Как только вещество начинает течь по измерительной трубке, скорость звуковых сигналов увеличивается в том направлении, в котором течет жидкость и уменьшается в противоположном направлении [29].

Ультразвуковые расходомеры в свою очередь делятся на:

- 1) частотные расходомеры, в которых измеряют разность частот повторения коротких импульсов или пакетов ультразвуковых колебаний;
- 2) фазовые расходомеры, в которых измеряют разность фазовых сдвигов ультразвуковых колебаний;
- 3) временно-импульсные расходомеры, в которых происходит непосредственное измерение разности времени прохождения коротких импульсов [27];
- 4) резонансные расходомеры;
- 5) одноканальные (с двумя пьезоэлементами);
- 6) двухканальные (в наличии четыре пьезоэлемента);
- 7) многоканальные [29].

Ультразвуковые расходомеры являются наиболее перспективными для коммерческого учета, поскольку имеют ряд преимуществ:

- 1) отсутствие подвижных частей и частей, выступающих в поток;
- 2) не создают дополнительных потерь напора;
- 3) в течение длительного времени могут работать от встроенного автономного источника питания;

- 4) точность может калиброваться до $<0,1\%$;
- 5) измерения являются относительно точными, даже когда датчик выходит из строя [30].

В других первичных измерительных устройствах, таких как турбинные расходомеры, трудно понять: или они все еще точно работают после некоторого периода эксплуатации. Такой фактор как загрязнение от масла трубопровода может повлиять на точность любого датчика. Часто необходим визуальный осмотр для проверки надлежащей работы измерительного прибора. Для ультразвуковых счетчиков предлагают электронную диагностику, которая помогает проверить надлежащее рабочее состояние и тем самым снижает внутреннее вмешательство, часто необходимое для других измерительных устройств. Внутреннюю диагностику можно также использовать для проверки других показателей измерительной конструкции, таких как: температура и газ [28].

Несмотря на очевидные преимущества ультразвуковых счетчиков, существуют следующие недостатки метода:

- 1) ограничение по минимальной скорости потока;
- 2) сложность и высокая стоимость устройств, которая при прочих равных условиях в 3 – 4 раза превышает стоимость тахометрических и электромагнитных расходомеров;
- 3) влияние на показания счетчика пузырьков воздуха в потоке;
- 4) необходимость значительных длин линейных участков до и после преобразователя [31].

Сегодня существует огромное количество компаний, которые занимаются разработкой ультразвуковых расходомеров: «Krohne» (серия UFM, GFM, Altosonic), «Emerson» (Senior Sonic, Junior Sonic), «Sick Mahack» (СИИ).

Еще одним классом измерения расхода газа являются массовые расходомеры, среди которых тепловые и механические расходомеры. К тепловым относят калориметрические и термоанемометрические расходомеры, а к механическим – инерционные счетчики.

Кариолисовые расходомеры вместе с турбосиловыми и гигроскопичными относят к инерционным счетчикам. Внутри каждого кариолисового расходомера расположена трубка (например, фирма Yokogawa предлагает решение с двумя трубками) [32]. Так называемый возбудитель заставляет трубку колебаться с определенной тактовой частотой. Если в трубе отсутствует движение измеряемой среды – она колеблется равномерно.

Датчики, которые находятся на входе и на выходе из трубки регистрируют эти равномерные колебания. Как только измеряемая среда начинает перемещаться в трубе, появляются дополнительные продольные колебания. Под действием силы Кариолиса входная и выходная части трубы отклоняются в разные стороны, то есть присутствует смещение по фазе [33]. Высокочувствительные датчики воспринимают эти колебания. Как результат, смещение по фазе и является мерой расхода вещества. Чем выше скорость потока, тем больше периодов колебаний заключается в измерительный участок [34].

Эта группа расходомеров обладает высокой точностью и надежностью, направление движения потока не влияет на работу прибора, а при правильной установке кариолисовые расходомеры не чувствительны к вибрациям и перепадам температуры.

Такие расходомеры пригодны только для трубопроводов с небольшим диаметром, а их показания зависят от отложений шлаков в трубах.

Среди производителей кариолисовых расходомеров компания «Emerson» и ГК «Endress + Hauser» (Швейцария).

Выводы

Одной из важнейших задач современной энергетики является обеспечение максимально точного контроля расхода жидких и газообразных сред. Сегодня существует множество методов измерения расхода. Каждый из счетчиков имеет свои преимущества и недостатки, в зависимости от которых находит свое применение в промышленности. В связи с этим в работе

проанализированы существующие методы измерения расхода и предложена их классификация. Установлено, что благодаря своему широкому динамическому диапазону, надежной работе, высокой точности и удобной диагностике перспективным методом является ультразвуковой. Несмотря на свои очевидные преимущества, ультразвуковые расходомеры достаточно дорогие, а увеличение количества каналов значительно усложняет программную реализацию обработки информации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ряховский С. В. Основные принципы создания единой системы учета газа в региональной компании поставщика газа / С. В. Ряховский, Л. Г. Паскаль // Энергосбережение. – 2005. – № 10. – С. 54 – 58.
2. Тюленев Л. Н. Методы и средства измерений, испытаний и контроля / Л. Н. Тюленев, В. В. Шушерин, А. Ю. Кузнецов; под ред. С. В. Кортов. – Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ УПИ, 2005. – 76 с.
3. ЭлектроТехИнфо: информационная торговая система [Электронный ресурс]: Тахометрические счетчики и расходомеры. Устройство, принцип действия, типы и виды тахометрических счетчиков и расходомеров. – Режим доступа: http://www.eti.su/articles/izmeritelnaya-tehnika/izmeritelnaya-tehnika_527.html. – Назва з екрану.
4. MESKOTEX MESS- UND KONTROLLTECHNIK [Электронный ресурс]: Диафрагменные расходомеры. – Режим доступа: <http://www.meskotex.com/diaphragm.htm>. – Назва з екрану.
5. DS/OM-RU Редакция 2 [Электронный ресурс]: Компактный диафрагменный расходомер OriMaster. Техническое описание. – Режим доступа: [http://www05.abb.com/global/scot/scot203.nsf/veritydisplay/0b3b45a281a88c9bc12575a80037b487/\\$file/ds_om-ru_2.pdf](http://www05.abb.com/global/scot/scot203.nsf/veritydisplay/0b3b45a281a88c9bc12575a80037b487/$file/ds_om-ru_2.pdf). – Назва з екрану.
6. To build [Электронный ресурс]: Виды газовых счётчиков: мембранные, ротационные, турбинные счётчики. Вихревой расходомер. – Режим доступа: <http://gas.to-build.ru/content/view/56/44/>. – Назва з екрану.
7. LICON [Электронный ресурс]: Типы расходомеров. – Режим доступа: http://elicon.ru/?page_id=1450. – Назва з екрану.
8. MESKOTEX MESS- UND KONTROLLTECHNIK [Электронный ресурс]: Турбинные расходомеры. – Режим доступа: <http://www.meskotex.com/hm.htm>. – Назва з екрану.
9. Правила метрологии ПР 50.2.019-2006 «Методика выполнения измерений при помощи турбинных, ротационных и вихревых счетчиков» / ред. В. Н. Копысов. – М.: ФГУП «Стандартинформ», 2007. – 33 с.
10. Журнал «Энергетика и ТЭК» [Электронный ресурс]: Расходомеры: принципы работы и опыт эксплуатации. – Режим доступа: http://www.energetika.by/arch/~page_m21=6~news_m21=140. – Назва з екрану.
11. Газовик [Электронный ресурс]: Турбинные счетчики газа. – Режим доступа: <http://gazovik-gaz.ru/spravochnik/consum/turbinnyie-schetchiki-gaza.html>. – Назва з екрану.
12. YOKOGAWA [Электронный ресурс]: Вихревой расходомер, вихревой расходомер – принцип действия. – Режим доступа: <http://www.yokogawa.ru/measurementcharge?prod=443>. – Назва з екрану.
13. Технический паспорт D184S035U03 Rev. 12 [Электронный ресурс]: 2-проводное компактное устройство. Измерительный преобразователь на базе цифрового сигнального процессора. – Режим доступа: [http://www05.abb.com/global/scot/scot211.nsf/veritydisplay/53187d45f8a21695c1257950003daaec/\\$file/D184S035U03-RU-12-11_2011.pdf](http://www05.abb.com/global/scot/scot211.nsf/veritydisplay/53187d45f8a21695c1257950003daaec/$file/D184S035U03-RU-12-11_2011.pdf). – Назва з екрану.
14. Руководство по эксплуатации 00809-0107-4860 [Электронный ресурс]: Расходомеры вихревые Rosemount 8600D. – Режим доступа: <http://www2.emersonprocess.com/siteadmincenter/PM%20Rosemount%20Documents/00809-0107-4860.pdf>. – Назва з екрану.
15. Научно-производственная фирма "Раско" [Электронный ресурс]: О применимости различных методов измерения расхода для коммерческого учета газа. – Режим доступа: <http://www.packo.ru/node/1763>. – Назва з екрану.
16. Руководство по эксплуатации 2.784.000 РЭ [Электронный ресурс]: СЧЁТЧИК ГАЗА РОТАЦИОННЫЙ РГ-К-Ех. – Режим доступа: http://www.ppx.ru/product/re_rgk.pdf. – Назва з екрану.
17. ПРАМЕНЬ [Электронный ресурс]: Струйные расходомеры. – Режим доступа: <http://npropramen.ru/information/other-flowmeters/specific-methods/3-jet-flowmeters>. – Назва з екрану.
18. Научно-производственная фирма "Раско" [Электронный ресурс]: О применении струйного автогенераторного метода измерения в бытовых счетчиках газа и поверочных установках. – Режим доступа: <http://www.packo.ru/node/2151>. – Назва з екрану.
19. Чаплыгин Э. И. Математическая модель струйного расходомера. / Э. И. Чаплыгин, Ю. В. Земсков, В. В. Корзин // Журнал технической физики. – 2004. – т. 74. – № 4. – С. 16 – 19.
20. Измерение расхода с использованием осредняющих напорных трубок [Электронный ресурс] / В. Н. Жук

- // Энергетика и ТЭК. – 2010. – № 2.
http://www.energetika.by/arch/~year__m21=2010~month__m21=2~page__m21=1~news__m21=568.
21. ETS [Электронный ресурс]: Основные принципы измерения расхода газа с помощью осредняющей напорной трубки. – Режим доступа: <http://www.ets.inf.ua/PDF/Intra/%D0%9E%D1%81%D0%BD%D0%BE%D0%B2%D0%BD%D1%8B%D0%B5%20%D0%BF%D1%80%D0%B8%D0%BD%D1%86%D0%B8%D0%BF%D1%8B%20%D0%B8%D0%B7%D0%BC%D0%B5%D1%80%D0%B5%D0%BD%D0%B8%D1%8F%20%D1%80%D0%B0%D1%81%D1%85%D0%BE%D0%B4%D0%B0%20ITABAR-%D0%B7%D0%BE%D0%BD%D0%B4.pdf>. – Назва з екрану.
22. Автоматизация производственных процессов [Электронный ресурс]: Ионизационные расходомеры. – Режим доступа: <http://ru-auto.info/post/101488904990008/>. – Назва з екрану.
23. Мегапаскаль – инфопортал [Электронный ресурс]: Ионизационные расходомеры. – Режим доступа: <http://megapaskal.ru/pribery/rashod-pribor/228-i-snova-rashodomery-rashodomery-ionizacionnye.html>. – Назва з екрану.
24. Прамень [Электронный ресурс]: Электромагнитные расходомеры. – Режим доступа: <http://npropramen.ru/information/other-flowmeters/physycal-phenomena/12-electromagnetic-flowmeters>. – Назва з екрану.
25. Расходомер.ру. [Электронный ресурс]: Что такое электромагнитный расходомер?!. – Режим доступа: http://www.td-rashodomer.ru/info/articles/elektromagnitnii_rashodomer.htm. – Назва з екрану.
26. Новый способ измерения расхода природного газа ультразвуковым методом [Электронный ресурс] / А. М. Деревягин, А. С. Фомин, В. В. Козлов // Газпром Россия. – 2008. – Режим доступа: <http://nprovmpel.ru/files/pdf/hyperflow-us.pdf>.
27. Андрієшин М. П. Вимірювання витрати та кількості газу: Довідник / М. П. Андрієшин. – Івано-Франківськ: ПП “Сімік”, 2004. – 160 с.
28. American school of gas measurment technology [Электронный ресурс]: Fundamentals of multipath ultrasonic flow meters for gas measurement. – Режим доступа: <http://asgmt.com/wp-content/uploads/pdf-docs/2011/1/F05.pdf>. – Назва з екрану.
29. Взлет.ру. [Электронный ресурс]: От однолучевых ультразвуковых расходомеров к многолучевым: критерий выбора. – Режим доступа: <http://www.vzljot.ru/files/publications/odnoluch-ultrasonic.pdf>. – Назва з екрану.
30. Chattopadhyay P. Flowmeters & Flow Measurement Ч. 2. / P. Chattopadhyay. – New Delhi, 2006. – 76 с.
31. Электротехинфо. [Электронный ресурс]: Ультразвуковые расходомеры. Устройство, принцип действия, типы и виды ультразвуковых расходомеров. – Режим доступа: http://www.eti.su/articles/izmeritelnaya-tehnika/izmeritelnaya-tehnika_529.html. – Назва з екрану.
32. YOKOGAWA. [Электронный ресурс]: Измерения расхода с помощью кориолисовых расходомеров в случае двухфазного потока. – Режим доступа: <http://www.yokogawa.ru/default.aspx?mode=binary&id=502>. – Назва з екрану.
33. Естествознание и математика. [Электронный ресурс]: Сила кориолиса в общем курсе физики. – Режим доступа: http://www.pskgu.ru/projects/pgu/storage/wt/wt141/wt141_02.pdf. – Назва з екрану.
34. Autoworks. [Электронный ресурс]: Измерение массового расхода. Кориолисовый расходомер. – Режим доступа: <http://autoworks.com.ua/teoreticheskie-svedeniya/izmerenie-massovogo-rasxoda-koriolisovyy-rashodomer/>. – Назва з екрану.
35. Организация учета природного газа. Основные принципы, методы и средства обеспечения метрологической надежности узлов коммерческого учета газа [Электронный ресурс] / С. А. Золотаревский, О. Г. Гушин // Ежегодный сборник научно-технических статей, выпускаемый ООО “ЭЛЬСТЕР Газэлектроника”. – 2012. – Режим доступа: <http://www.packo.ru/node/2150>.

Билинский Иосиф Иосифович – д. т. н., профессор, заведующий кафедрой электроники.

Стасюк Марина Алексеевна – магистрант кафедры электроники.
 Винницкий национальный технический университет.

Гладышевский Николай Владимирович – ведущий специалист метрологического центра.
 НАК "Нафтогаз Украины".